



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## SNIŽOVÁNÍ PRODUKCE ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH MODERNÍCH MOTORŮ

REDUCE THE PRODUCTION OF POLLUTANTS IN THE EXHAUST GASES OF MODERN  
ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV MATUŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN BERAN

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jaroslav Matuška

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech moderních motorů**

v anglickém jazyce:

### **Reduce the production of pollutants in the exhaust gases of modern engines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na přehled jednotlivých metod a možností snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech u spalovacích motorů moderních automobilů.

Cíle bakalářské práce:

Práce musí obsahovat:

1. Současný přehled používaných způsobů snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech moderních automobilů
2. Rozdělení jednotlivých způsobů a metod dle zvolených kritérií
3. Stručný přehled legislativních požadavků na soudobé automobily
4. Nastínění trendů a směrů vývoje zadané problematiky do budoucna
5. Shrnutí a zhodnocení zadané problematiky

Seznam odborné literatury:

[1] Exhaust Systems for Motor Vehicles : Catalytic Converters for Otto Cycle Engines.  
Landsberg/Lech : Verlag Moderne Industrie, 2001. 70 s.

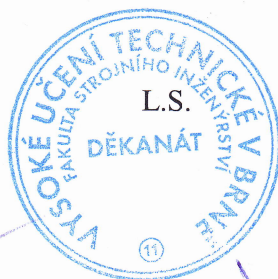
[2] STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire:  
Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999


3) Heck R. and Farrauto R.: Catalytic air pollution control: Commercial Technology. 2nd  
edition. New York, 2002. 391 p. ISBN 0-471-43624-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Beran

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 8.11.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan



## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech moderních spalovacích motorů. Popisuje dílčí sledované nežádoucí emise a legislativu, která reguluje jejich podíl ve výfukových plynech. Zabývá se jednotlivými metodami a možnostmi redukce obsahu škodlivin ve výfukových plynech a nastiňuje trendy a budoucnost v této oblasti inženýrství.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

způsoby snižování škodlivin ve výfukových plynech, exhalační norma Euro, katalyzátor

## **ABSTRACT**

The main scope of this bachelor thesis is reduction of the production of pollutants in the exhaust gases of modern engines. It describes observed undesirable emissions and legislation which regulates pollutants ratio. It focuses on methods of reduction of the pollutants content in the exhaust gases and outlines the trends and future in this engineering area.

## **KEYWORDS**

methods of reducing the production of pollutants in the exhaust gases, emission standard Euro, catalytic converter



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MATUŠKA, J. *Snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech moderních motorů*.  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 58 s. Vedoucí  
bakalářské práce Ing. Martin Beran.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Berana a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2014

.....

Jaroslav Matuška



## PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Beranovi za rady, zpětnou vazbu a motivaci, kterou mi dával při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům, bratrovi a Kláře Samohýlové za důvěru a podporu při mém dosavadním studiu.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Sledované emise .....	11
1.1 Proces spalování .....	11
1.2 Hlavní zástupci sledovaných škodlivin.....	12
1.3 Srovnání podílu výfukových plynů mezi zážehovým a vznětovým motorem.....	14
2 Legislativa .....	15
2.1 Emisní normy.....	15
2.2 Snižování emisí CO <sub>2</sub> v celosvětovém měřítku .....	16
2.3 Nízkoemisní zóny .....	18
3 Rozdělení způsobů snižování škodlivin ve výfukových plynech.....	20
4 aktivní snižování škodlivin ve výfukových plynech .....	21
4.1 Kompresní poměr .....	21
4.2 Tvar spalovacího prostoru .....	21
4.3 Poloha zapalovací svíčky.....	22
4.4 Ventilový systém .....	23
4.5 Uspořádání sacího systému.....	25
4.6 Vstřikování paliva.....	26
4.6.1 Nepřímé vstřikování .....	26
4.6.2 Přímé vstřikování.....	26
4.7 Vysokotlaké vstřikování u vznětových motorů .....	28
4.8 Snižování mechanických ztrát .....	29
4.9 Koncepce chudých směsí.....	30
4.10 Zhodnocení metod pro snížení vzniku škodlivin ve výfukových plynech.....	32
5 Pasivní snižování škodlivin ve výfukových plynech.....	33
5.1 Katalyzátor.....	33
5.1.1 Oxidační katalyzátor.....	33
5.1.2 Dvoukomorový katalyzátor .....	34
5.1.3 Třícestný katalyzátor a lambda regulace .....	35
5.1.4 Zásobníkový katalyzátor.....	37
5.1.5 Selektivní katalyzátor .....	39
5.2 Recirkulace výfukových plynů .....	40
5.3 Filtr pevných částic .....	44
5.3.1 Aditiva do paliva pro snížení obsahu pevných částic.....	45
5.4 Zhodnocení dodatečných úprav pro snížení škodlivin ve výfukových plynech .....	46
6 Trendy a budoucnost .....	47





6.1	Z pohledu motoru.....	47
6.2	Z pohledu alternativních paliv .....	50
6.3	Z pohledu optimalizace a hospodárnosti vozu.....	50
	Závěr.....	52
	Seznam obrázků.....	57
	Seznam grafů.....	58
	Seznam tabulek.....	58



## ÚVOD

Za posledních dvacet let v Evropě prudce narostl počet automobilů. Může za to především konec studené války a o dva roky později vznik Evropské unie, což způsobilo otevření trhu a globalizaci. Byly doby, kdy automobilky vyráběly jeden, dva, tři modely, vesměs s podobnou konfigurací, lišící se hlavně v barvě vozu. Dnes se ale výrobci snaží co nejvíce pokrýt svojí nabídkou prostor trhu a zvýšit tím svůj tržní podíl, což vede k nárůstu počtu modelů. A tak uvádí na trh každý rok nový model, počítaje omlazení celé řady zpravidla po třech letech. BMW nyní například nabízí 44 modelů. Výrobci tak umožňují nespočet konfigurací a možnosti rozsáhlé individualizace. Rovněž s dobou jsou kladeny nové požadavky zákazníků, proto vznikají nové segmenty, jako jsou crossovery, čtyř a nyní i pěti dveřové kupé apod. Zároveň už není raritou, že ryze sportovní značky vyrábějí velké SUV, do kterých montují dříve nemyslitelný diesel.

Velký nárůst automobilů a celé dopravní infrastruktury má negativní dopad na životní prostředí, jehož součástí je i člověk, který znečištěné ovzduší nejvíce pociťuje ve městech. Výfukové plyny mají totiž neblahý vliv na živý organismus, jsou karcinogenní, vytváří smog, ozon a další nebezpečné látky. Což přimělo úřady k regulaci škodlivin ve výfukových plynech. První legislativní norma omezující tyto nežádoucí emise začala platit v USA v Kalifornii v roce 1968. V Evropě pak od roku 1971 začali platit normy EHK (Evropské hospodářské komise). Spolu s vytvořením Evropské unie v roce 1993 vznikla exhalační norma Euro, zavazující se pro všechny členské státy. Další zemí, která má své výfukové normy je Japonsko. Bohužel je i dnes stále mnoho zemí, kde jsou škodliviny ve výfukových plynech například zcela bez regulace.

Stále zpřísnující se normy, které vychází zpravidla po čtyřech letech, a nyní plánovaná norma Euro 6, která má vstoupit v platnost od září letošního roku, nutí výrobce k radikálnímu snižování škodlivin ve výfukových plynech. Automobilky tak zásadně snižují hmotnost vozidla, zlepšují aerodynamiku vozu, přidávají různé systémy a filtry do výfukového systému, zlepšují hospodárnost vozu a zavádějí alternativní pohony a paliva. Především však zefektivňují spalovací proces a zvyšují účinnost motoru, aneb provádějí downsizing.



# 1 SLEDOVANÉ EMISE

Emise jsou látky, vypouštěné do životního prostředí vyjadřují koncentraci smogu či jiných škodlivých látek ve vzduchu. Množství emisí se obecně udává v hmotnostní jednotce vypouštěné škodlivé látky za čas. U osobních a užitkových automobilů se v rámci norem Euro udávají vypuštěné škodliviny v gramech za jeden ujetý kilometr, který je dán přesně definovaným jízdním evropským cyklem.

## 1.1 PROCES SPALOVÁNÍ

Činnost spalovacího motoru je založena na spalování směsi paliva, což je chemický proces na základě oxidace hořlavých složek paliva s kyslíkem obsaženým ve vzduchu. Při této chemické reakci vzniká tepelná energie, kterou dále přeměňujeme na energii mechanickou. Kvalita spalování závisí na správném poměru paliva a kyslíku, na jejich promísení a na konstrukci spalovacího motoru. [13]

U dokonalého spalování vzniká pouze oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  a vodní pára  $\text{H}_2\text{O}$ . Samy o sobě tyto dvě látky nejsou pro člověka nijak škodlivé, bohužel ale způsobují skleníkový efekt.



Za to u nedokonalého spalování vzniká, mimo jiné, již nežádoucí plyn oxid uhelnatý  $\text{CO}$ .



Reálné a neúplné spalování v motorovém prostoru je však popsáno mnoha složitými rovnicemi, jejichž výslednými složkami jsou včetně  $\text{CO}_2$  a  $\text{CO}$  celé řady dalších nebezpečných škodlivin, které mají přímý dopad i na zdraví lidského organismu. Celý proces spalování je tedy ovlivněn řadou faktorů, které mají vliv na kvalitu výfukových plynů.

Faktory ovlivňující kvalitu spalování mohou být: nedostatek času pro dokonalé spálení směsi, nedostatečně promíchaná spalovací směs a nedostatečný přísun vzduchu, příliš vysoké



spalovací teploty a tlaky. Špatně navržený spalovací prostor a další prvky neumožňující kvalitní spalování. [7]

## 1.2 HLAVNÍ ZÁSTUPCI SLEDOVANÝCH ŠKODLIVIN

Spalovací motory jsou zodpovědné za celosvětovou produkci více než 70 % emisí CO a 19 % emisí CO<sub>2</sub>. Mimo produkty dokonalého spalování (CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O), které mají dominantní zastoupení, se ve výfukových plynech vyskytují další složky. Z hlediska škodlivosti se pak rozdělují na škodlivé a neškodlivé. Mezi neškodlivé patří plyny dusík N<sub>2</sub>, vodní pára H<sub>2</sub>O, oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, kyslík O<sub>2</sub> a další. Neškodlivost je pouze relativní, neboť se zde zařazuje i oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, který jak již bylo zmíněno, vytváří skleníkový efekt. Mezi škodlivé potom patří oxid uhelnatý CO, oxidy dusíku NO<sub>x</sub>, nespálené uhlovodíky HC a pevné částice PM. [11, 13]

**Oxidy uhelnaté CO**, které vznikají nedokonalým spalováním při nedostatku kyslíku ve spalované směsi, nebo lokálním nedostatkem kyslíku ve spalovacím prostoru.

Je to plyn bez zápachu, váže se na hemoglobin v červených krvinkách a snižuje tak hladinu kyslíku O<sub>2</sub> v krvi, způsobuje bolest hlavy, závrat' a ztrátu vědomí. [12]

**Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>** vznikají oxidací dusíku přiváděného do spalovacího prostoru v nasávaném vzduchu společně s kyslíkem. Oxidy dusíku tvoří oxid dusnatý NO, oxid dusný N<sub>2</sub>O a oxid dusičitý NO<sub>2</sub>. Oxidy dusíku vznikají při vysokých teplotách a tlacích ve spalovacím prostoru. Jejich tvorba je tak závislá na bohatosti směsi a koncentraci kyslíku. Největší zastoupený 95 % má oxid dusnatý NO, který je bohužel velmi toxický. Proto jsou oxidy dusíku jedny z neproblematictějších škodlivin ve výfukových plynech. [12, 13]

Dalším příkladem může být oxid dusičitý NO<sub>2</sub>, který má červenohnědou barvu a nepříjemný zápach, je toxický a dráždí oči, plíce a dýchací cesty. Ve větší míře způsobuje nespavost, kašel a zrychlené dýchání. [12]

**Nespálené uhlovodíky HC** jsou zastoupeny ve výfukových plynech v různých formách. Vznikají za velmi nepříznivých oxidačních podmínek buď přímo z paliva jako výsledek předčasně zastavených reakcí v zhášecích zónách (velký přebytek vzduchu



a nízká teplota hoření např. v blízkosti stěn), nebo jako produkt tepelných krakovacích a chemických reakcí. [9, 13]

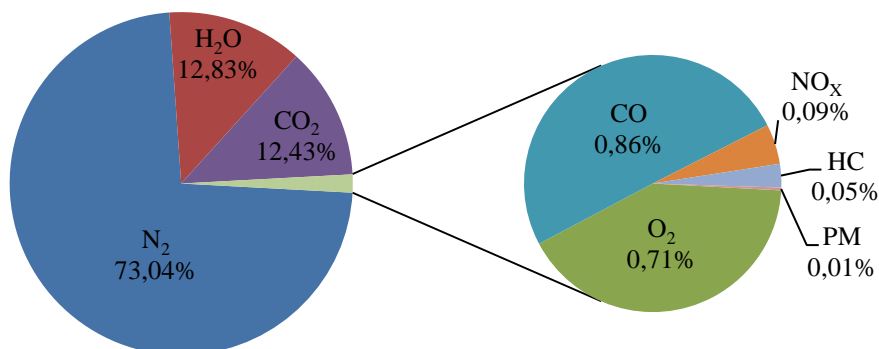
Nespálené uhlovodíky způsobují charakteristický zápach výfukových plynů. Škodlivost uhlovodíků se zvyšuje vazbou na povrch pevných částic. Poškozují především dýchací cesty a některé z nich jsou i karcinogenní. [12]

**Pevné částice PM**, jsou považovány za nejzávažnější škodlivinu ve výfukových plynech. Vyskytují se v naředěném plynu v pevné nebo kapalně formě jako jsou saze, karbon, popel, zbytky nespáleného motorového oleje a paliva, otěrové částice a další. Saze se tvoří při spalování bez přístupu kyslíku s okolními vysokými teplotami, ke které může docházet místně nehomogenity směsi. Ve většině případů se rozměr částic pohybuje v rozsahu 0,3 - 1  $\mu\text{m}$ , může však v menším množství dosahovat až 5 - 30  $\mu\text{m}$ , přičemž částice o rozměrech 0,1 - 10  $\mu\text{m}$  jsou ty nejnebezpečnější. [9, 13]

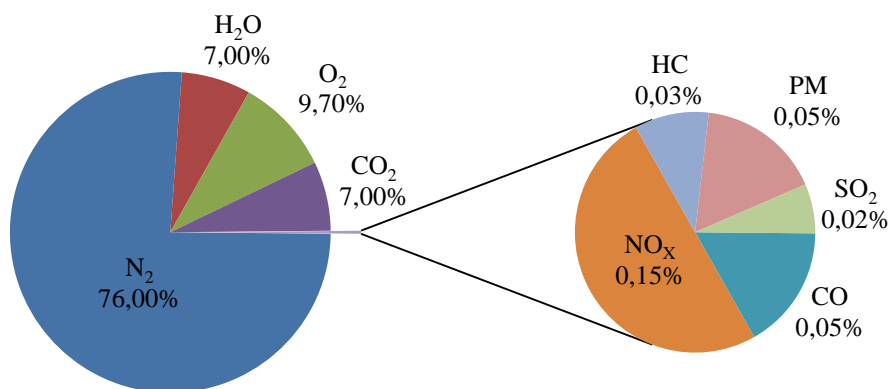
Na povrchu pevných částic se ve výfukovém potrubí při ochlazování spalin, usazují těžko odpařitelné skupiny nespálených uhlovodíků, hlavně tak polycyklické aromatické uhlovodíky, které patří právě k hygienicky nejškodlivějším složkám. Pevné částice mají především karcinogenní a mutagenní účinky. [12, 13]



### 1.3 SROVNÁNÍ PODÍLU VÝFUKOVÝCH PLYNŮ MEZI ZÁŽEHOVÝM A VZNĚTOVÝM MOTOREM



**Graf 1.3.1** Podíl výfukových plynů u zážehových motorů. [11]



**Graf 1.3.2** Podíl výfukových plynů u vznětových motorů. [11]

Ve srovnání motorů můžeme vidět hlavně rozdíl ve složení škodlivých plynů. Zážehový motor produkuje více škodlivin CO a CO<sub>2</sub>. Naopak u vznětových motorů mají nejvyšší zastoupení ve škodlivinách NO<sub>x</sub> a PM. Navíc ještě oproti zážehovému motoru produkuje oxid siřičitý SO<sub>2</sub>, což je štiplavý, páchnoucí, bezbarvý plyn, vznikající při spalování síry. Proto se dnes používá již odsířené palivo, které neobsahuje takřka žádnou síru. Nicméně východní země jako například Rusko zatím obsah síry v palivu neřeší. Oxid siřičitý má negativní dopad především na plíce a způsobuje onemocnění dýchacích cest. Dalším jeho negativním dopadem je tvorba kyselých dešťů.



## 2 LEGISLATIVA

### 2.1 EMISNÍ NORMY

První norma zabývající se množstvím výfukových zplodin vznikla v Kalifornii v roce 1968. O tři roky později v 1971 začala platit i pro Evropu její první emisní norma EHK 15.

Regulací nežádoucích emisí ve výfukových plynech se zabývá instituce Evropská komise (EC) pro Evropu, Environmental Protection Agency (EPA) pro USA, California Air Resources Board (CARB) pro Kalifornii a Japonské ministerstvo dopravy (MLIT) pro Japonsko.

Dnes již známé označení norem emisních předpisů Euro (+ číslo normy) vstoupilo v platnost, spolu se založením Evropské unie v roce 1993. Od té doby po každých třech až čtyřech letech vychází nové zpřísňující se povolené limity škodlivin ve výfukových plynech. Norma Euro je pak rozdělena na kategorie. Pro osobní vozidla a lehké užitkové automobily je číslována arabskými číslicemi, zato pro těžká nákladní auta a autobusy se používají římské číslice. Dále je příslušná norma rozdělena dle limitních hodnot škodlivin na podkategorie jednotlivých druhů vozidel. Nás bude zajímat kategorie osobních vozů M1.

**Tab. 2.1** Porovnání limitních hodnot škodlivin u zážehového a vznětového motoru mezi jednotlivými normami Euro. [14]

Norma	Platnost	CO		NO <sub>x</sub>		HC+NO <sub>x</sub>		HC	PM
		[g/km]							
Euro 1	1992	3,16	3,16			1,13	1,13		0,18
Euro 2	1996	2,20	1,00			0,50	0,70*		0,08**
Euro 3	2000	2,30	0,64	0,15	0,50		0,56	0,20	0,05
Euro 4	2005	1,00	0,50	0,08	0,25		0,30	0,10	0,025
Euro 5	2009	1,00	0,50	0,06	0,18		0,23	0,10	0,005
Euro 6	2014	1,00	0,50	0,06	0,08		0,17	0,10	0,005

Limitní hodnoty škodlivin pro zážehové motory

Limitní hodnoty škodlivin pro vznětové motory

\* 0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

\*\* 0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

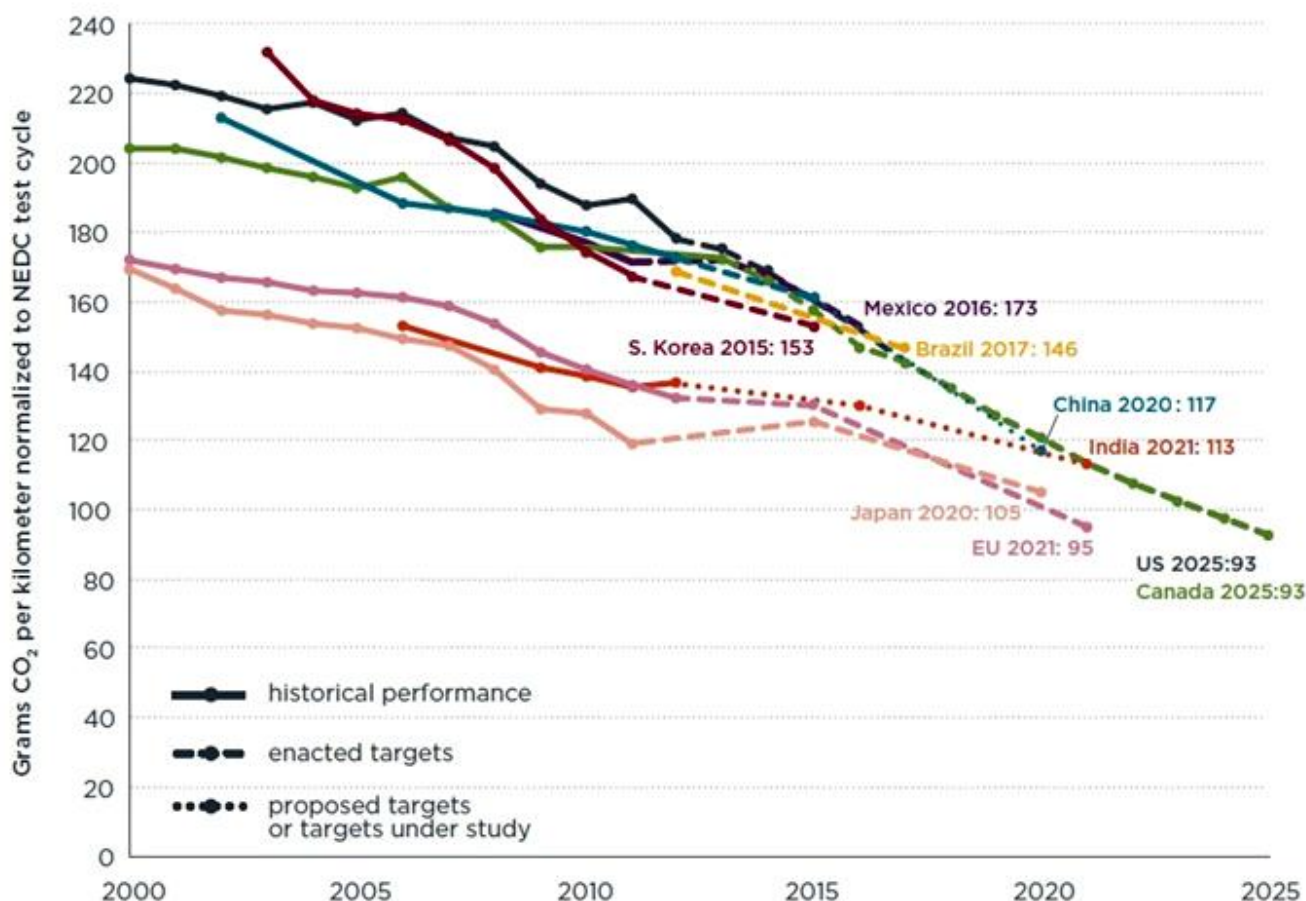


Velký zvrat ve snižování škodlivin ve výfukových plynech přišel až s normou Euro 4 a Euro 5, kdy se téměř všechny dosavadní limity měli zredukovat až o 50 %. Proto byli výrobci automobilů obecně nuceni k takzvanému downsizingu, zmenšování objemu motoru za zachování, či zvýšení jeho účinnosti, jednoduše řečeno z menšího motoru dostat stejný výkon a krouticí moment jako z velkého. To přináší výhodu ve snížení spotřeby, tedy hodnot  $\text{CO}_2$  a dalších škodlivin. U benzínových motorů tak automobilky přecházeli na přímé vstřikování paliva a přeplňování, zároveň optimalizovali třicestný katalyzátor a recirkulaci výfukových plynů. U dieselového motoru to bylo především zavedení filtru pevných částic. Nejnovější očekávaná exhalační norma Euro 6, která vstoupí v platnost v září roku 2014, se bude týkat hlavně vznětových motorů. U těch musí dojít k radikálnímu snížení oxidů dusíku  $\text{NO}_x$  a to až přes 50 %. Filtr pevných částic a oxidační katalyzátor tak bude muset být doplněn ještě zachytným  $\text{NO}_x$  katalyzátorem, nebo účinnějším přídavným SCR katalyzátorem, který využívá vstřikování reakčního činidla např. AdBlue (syntetická močovina), tím lze snížit množství oxidu dusíku až o 90 %.

## 2.2 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ $\text{CO}_2$ V CELOSVĚTOVÉM MĚŘÍTKU

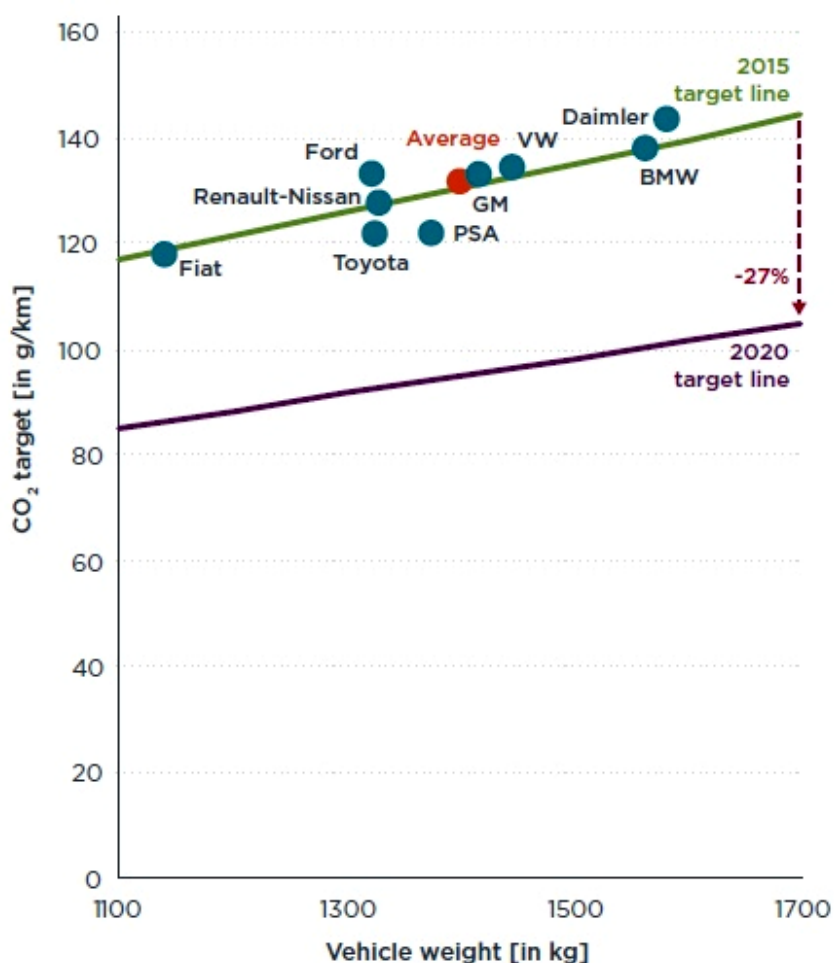
V průběhu posledních tří desetiletí většina hlavních světových trhů jako jsou Spojené státy americké, Evropská unie, Japonsko, Čína, Austrálie, Kanada přijaly různé formy emisních norem pro osobní vozidla. Ze začátku však šlo pouze o dobrovolné obecné zásady, které se během devadesátých let stávaly povinnými emisními normami, mimo Austrálii, která má doposud emisní normy pouze doporučené. Postupem času se však poté začínaly přidávat i další země a trhy, například Mexiko plánuje ztotožnění norem se zbytkem Severní Ameriky. Rovněž státy jako Indie, Brazílie vypracovaly směrnice předpisů pro dlouhodobé snížení škodlivých látek ve výfukových plynech. V roce 2004 pak byla zveřejněna zpráva o emisích skleníkových plynů, která navrhla metodiku pro přímé porovnávání emisních norem různých trhů pro osobní vozidla, definovanou v gramech  $\text{CO}_2$  na jeden ujetý kilometr. [21]





**Obr. 2.2.1** Porovnání redukce emisí CO<sub>2</sub> na světových trzích. [23]

Z obr. 2.2.1 můžeme vidět světovou produkci emisí CO<sub>2</sub> rozdělenou na jednotlivé trhy. Přičemž lze pozorovat roky přijetí norem jednotlivých států, jejichž průkopníky byla Severní Amerika, Japonsko a Evropská unie. Dále můžeme pozorovat vize jednotlivých států do budoucna pro snižování škodlivých výfukových látek. Evropská unie tak chce do roku 2021 snížit produkci emisí CO<sub>2</sub> na pouhých 95 g/km, což by znamenalo nejnižší produkci škodlivin ve výfukových plynech ze všech světových trhů. Podobně přísné limity si stanovilo i Japonsko se svými 105 g/km. Zato na druhé straně je nejvíce benevolentní Mexiko 173 g/km, které však přijalo emisní limity až v roce 2008. Dále jednu z největších dlouhodobých redukcí emisí CO<sub>2</sub> zažívají Spojené státy americké, které se mají v plánu dostat od roku 2000 z 260 g/km do roku 2025 na hranici 93 g/km.



**Obr. 2.2.2** Snížení emisí CO<sub>2</sub> jednotlivých automobilových koncernů v rámci norem Euro. [24]

Z obr. 2.2.2 vidíme jednotlivé automobilové koncerny v závislosti jejich průměrné produkce emisí CO<sub>2</sub> na jejich průměrné hmotnosti vozidla. Obecně lze říci, že těžší vozidla s většími motory vyprodukují více škodlivin. Celkový průměr pro rok 2015 byl stanoven na 130 g/km, který by se pro rok 2020 (efektivně v 2021) měl snížit až od 27 % teda a průměrnou hodnotu 95 g/km CO<sub>2</sub>.

## 2.3 NÍZKOEMISNÍ ZÓNY

Znečištěné ovzduší je problém hlavně ve městech, kde je velká kumulace motorových vozidel, která svými výfukovými plyny mají přímý dopad na člověka. Mimo exhalační normy, které obecně omezují produkci nežádoucích emisí, začala některá města zavádět takzvané nízkoemisní zóny (NEZ, popř. LEZ z angl. low emission zones). Ty omezují vjezd vozidlům do takto označených oblastí. Vztahují se buď na vozidla nad 3,5 t, nebo i v mnoha městech



na osobní automobily. Ty musejí splňovat dané normy Euro, pro získání dané emisní plakety (povolení), ve formě nálepky, která je umístěna na čelním skle vozidla. Ta je odstupňována ve třech úrovních, kdy každé přísluší náležitá barva (červená, žlutá a zelená). První nízkoemisní zóna vznikla ve Švédském městě Göteborg v roce 1996. Nyní se již můžeme s nízkoemisními zónami setkat v jedenácti státech Evropy a v Japonsku. Nejrozšířenější systém omezujících zón však najdeme v Německu. V České republice bylo v únoru 2013 schváleno nařízení vlády, které stanovuje podmínky pro zřizování nízkoemisních zón na našem území. Hlavní město Praha tak omezila vjezd vozidlům nad 3,5 t a dále plánuje zavést nízkoemisní zóny i pro osobní automobily. Dalšími městy, která uvažují o zavedení těchto zón je Ostrava, Plzeň nebo lázeňská města Klimkovice a Karlovy Vary.



*Obr. 2.3 Navrhované emisní plakety pro ČR [25]*

Z předcházejících údajů a z dalších požadavků na šetrnější vztah k našemu zdraví a přírodě, tak vyplývá, že tlak na omezování produkce škodlivin ve výfukových plynech bude sílit. Nejde však jen o toxické látky, ale i o stále větší množství  $\text{CO}_2$ , které se dostává do ovzduší jakožto produkt dokonalého spalování. Omezování produkce  $\text{CO}_2$  je tak v současné době možné především snižováním spotřeby paliva. Proto byl prohlášen závazek, u kterého je cílem dosáhnout v Evropské unii v roce 2020 (efektivně v 2021) u osobních automobilů produkci  $\text{CO}_2$  pod 95 g/km. Tím jsou zvýšeny nároky na automobilky, které při nedodržení limitních flotilových emisí jsou penalizovány ohromnými pokutami. [10]



### 3 ROZDĚLENÍ ZPŮSOBŮ SNIŽOVÁNÍ ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH

Snižování podílu škodlivin ve výfukových plynech můžeme provádět dvěma způsoby, aktivně nebo pasivně. Aktivní způsob snižování škodlivin znamená předejití jejich vzniku, což uskutečníme výběrem kvalitního paliva nebo zdokonalováním spalovacího procesu uvnitř motoru. Snahou výrobců automobilů je se pohybovat na limitu současných technologických možností s co největší účinností, bohužel však stále nedokážeme přizpůsobit spalovací proces bez nežádoucího vzniku škodlivin. Proto řešíme následnou redukci podílu emisí ve výfukových plynech. Tohoto pasivního snižování obsahu již vzniklých škodlivin docílíme za pomoci dodatečných systémů a filtrů.

U aktivního snižování škodlivin se zaměříme hlavně na konstrukční prvky spalovacího motoru, které mají největší vliv na podíl vzniku nežádoucích emisí. Je to především vliv kompresního poměru, tvaru spalovacího motoru, polohy zapalovací svíčky, u které se pozastavíme nad metodou Twin Spark. Další důležitou roli hraje celý ventilový systém, uspořádání sacího systému a způsob vstřikování paliva, kde se zaměříme na trend vstřikování paliva jak u zážehových, tak u vznětových motorů. Nastíníme problematiku snižování mechanických ztrát a zakončíme trendem koncepce chudých směsí.

U pasivního snižování a eliminace již vzniklých škodlivin ve výfukových plynech se zaměříme hlavně na jednotlivé druhy katalyzátorů a jejich oblasti použití, kde zmíníme i nejnovější systémy jako je  $\text{NO}_x$  zásobníkový a selektivní katalytický konvektor, které jsou klíčové pro splnění nejnovější normy Euro 6 u vznětových motorů. Dále se budeme zbývat recirkulací výfukových plynů a filtrem pevných částic.



## 4 AKTIVNÍ SNIŽOVÁNÍ ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH

Spalovací motor se skládá z mnoha konstrukčních prvků, které mají vliv na proces spalování a tak i na tvorbu emisí. Nicméně kromě vzniku nežádoucích škodlivin, mají tyto prvky značný vliv na spotřebu paliva, výkon, točivý moment, sklony ke klepání, klidný a tichý chod motoru a další charakteristiky pístového motoru. Proto se výrobci automobilů snaží najít nejlepší kompromis mezi těmito vzájemně si odporujícími požadavky pro konstrukci, co možno nejefektivnějšího spalovacího motoru. [1] Do aktivního snižování podílu škodlivin ve výfukových plynech se rovněž zahrnuje i kvalita paliva, my se ale budeme zabývat především druhým odvětvím, čímž je zdokonalování spalovacího procesu uvnitř motoru. Mezi hlavními konstrukčními záležitostmi ovlivňující tento proces tak jsou následující faktory.

### 4.1 KOMPRESNÍ POMĚR

Hraje důležitou roli u stupně tepelné účinnosti motoru. Při používání vyššího kompresního poměru (větší účinnosti) nastává zároveň nežádoucí vyšší sklon ke klepání a vyšší produkce škodlivých plynů. Se zvyšujícím se kompresním poměrem totiž roste hodnota teploty ve spalovacím prostoru. Tím dochází ke zvýšení počtu předčasných reakcí paliva, které vedou k samozapálení některých oblastí palivové směsi, ještě než jsou zapáleny normálně se šířícím plamenem. To zvyšuje nárok motoru na vyšší oktanové číslo paliva. Částečně se tomuto efektu lze vyhnout vhodně přizpůsobeným spalovacím prostorem. Zároveň však vyšší hodnota teploty představuje zvýšení emisí  $\text{NO}_x$ , neboť posune reakční rovnováhu silněji na stranu koncentrací  $\text{NO}_x$ , hlavně díky zvýšené reakční rychlosti vzniku  $\text{NO}_x$ . Při srovnání se zážehovými motory je vysoký kompresní poměr u vznětových motorů, jeden z hlavních důvodů většího zastoupení škodlivin  $\text{NO}_x$ . [1]

### 4.2 TVAR SPALOVACÍHO PROSTORU

Především ovlivňuje hodnotu nespálených uhlovodíků, které vznikají ve vrstvách poblíž stěn válců, které způsobují složité a velké povrchy spalovacího prostoru. Proto je při konstrukci kladen důraz na kompaktní spalovací prostor ideálně kulovitého tvaru s minimálním povrchem. Díky kterému lze při použití vyššího kompresního poměru lehčeji realizovat koncepci motorů s chudou směsí, čímž se dosáhne nižší hodnoty emisí při dobrém

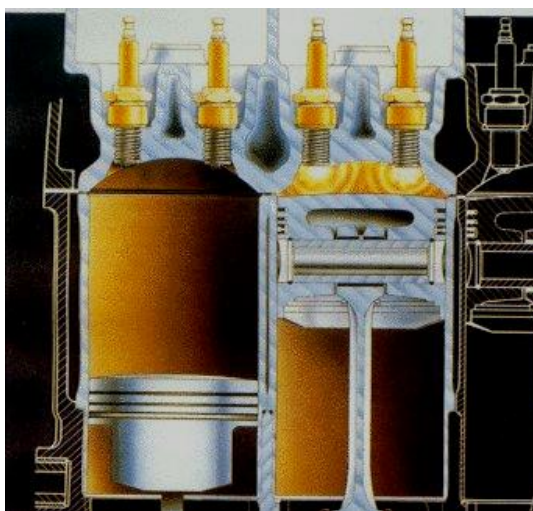


stupni účinnosti. [1] Dalším vlivem jsou turbulence v oblasti zapalovací svíčky, které vznikají při nasávání vzduchu, či směsi do spalovacího prostoru. Ty jsou důležité pro rovnoměrné zapálení směsi paliva a vzduchu, které jsou spolu s tvarem spalovacího prostoru důležitými faktory ovlivňující následné šíření čela plamene od jeho inicializace hoření. Proto jsou dnešní tvary spalovacích prostorů jakýmsi kompromisem k umožnění co možno nejefektivnějšího spálení směsi.

### 4.3 POLOHA ZAPALOVACÍ SVÍČKY

Má ve spalovacím prostoru významný vliv na spotřebu paliva a tvorbu škodlivých výfukových plynů. Centrální poloha zapalovací svíčky s krátkou dráhou plamene vede k rychlé a relativně úplné přeměně, čili nízkým hodnotám nespálených uhlovodíků. [1]

Další možností je princip dvojitého zapalování neboli dvou svíček pro každý válec, který je znám od roku 1914. Výhodou tohoto systému je dosažení optimálnějšího spalování, což přináší vyšší výkony a nižší emise. Jednotlivé svíčky se zapalují postupně, čímž zlepšují průběh hoření a zvyšují kompresní poměr. Nejprve první svíčka zapálí stlačenou směs, která se šíří skrz celý spalovací prostor, do čehož zapálí druhá svíčka s malou prodlevou směs z druhé strany, tím zajistí rovnoměrnější hoření. Použití velikosti svíček se liší dle počtu ventilů. Motory s dvěma ventily na válec mají všechny svíčky stejné. Zato čtyř ventilový rozvod má jednu svíčku větší a druhou menší. [15] Tuto techniku využívaly např. motory Twin Spark (tzn. zdvojená svíčka) dříve používané ve vozech Alfa Romeo. Následný příchod přímého vstřikování s hlavními požadavky na umístění vstřikovače a celkové uspořádání hlavy válce však tuto technologii uvedl do pozadí.



*Obr. 4.3 Řez spalovacím prostorem se dvěma svíčkami. [26]*

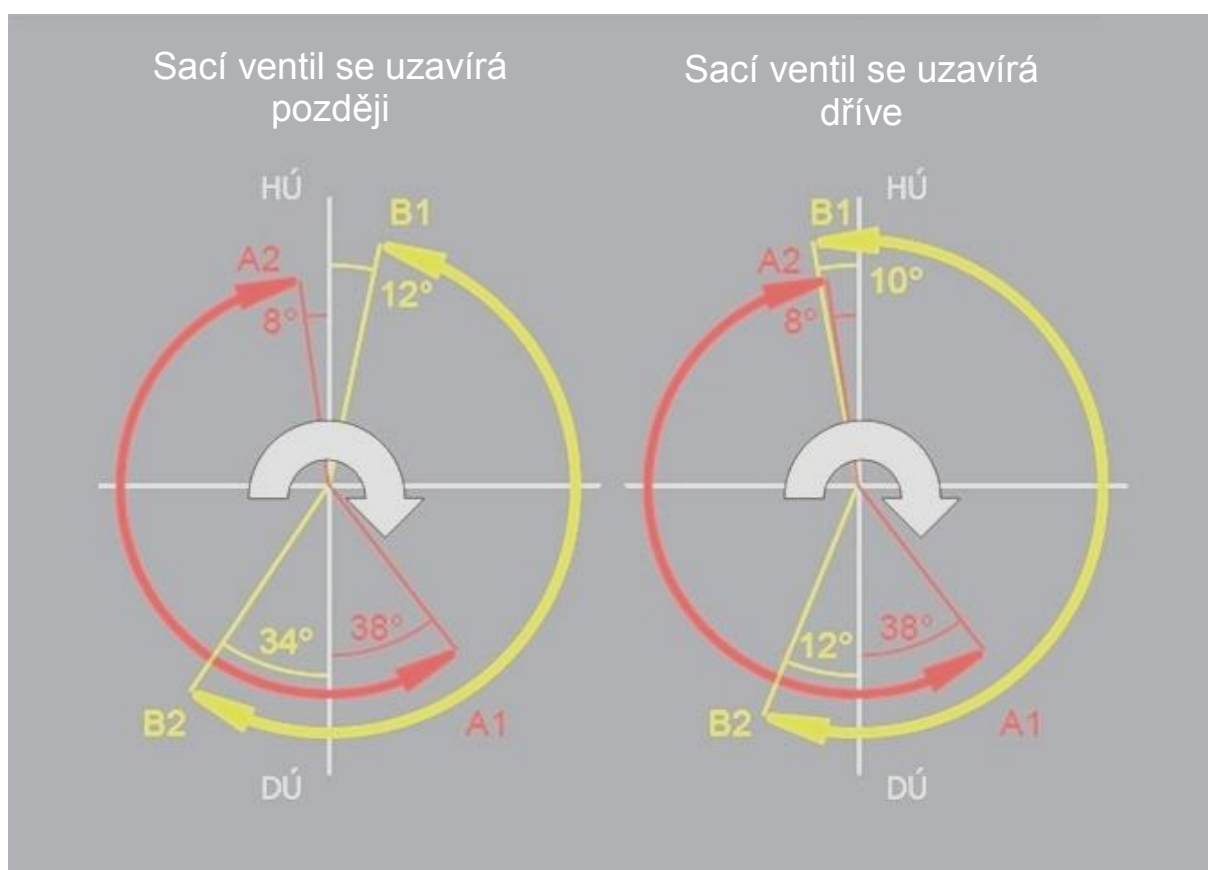




## 4.4 VENTILOVÝ SYSTÉM

Vyplachování válců neboli výměna spálené směsi ve válci za novou probíhá při vhodném otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů. To umožňuje vačková hřídel a daný typ rozvodu. Již nepoužívaný typ SV, nahradil postupem času rozvod OHV a OHC. Nejpožívanějším je dnes ale DOHC (rozvod OHC s dvěma vačkovými hřídeli). Klíčové je přesné načasování a zdvih ventilů v celém spektru možných otáček motoru. Čímž se docílí nejlepších provozních vlastností, ať už se jedná o vysoký výkon, vysoký krouticí moment v širokém rozsahu otáček, nižší spotřebu paliva, nebo nižší emise výfukových plynů. Této optimalizace se dosáhne tzv. variabilním časováním ventilů. Každá automobilka používá svoji techniku, nejčastější je to však natáčení vačkové hřídele, nebo úprava geometrie rozvodového mechanismu. Okamžik uzavření sacího ventilu totiž výrazně ovlivňuje kvalitu naplnění válce v závislosti na otáčkách motoru. Při větším plnění, které nastává ve vyšších otáčkách, se sací ventil uzavírá až za dolní úvratí pístu po sacím zdvihu, to je způsobeno díky setrvačnosti sloupce čerstvé směsi, tím se dosáhne přídatného plnění válce. Naopak při nižších otáčkách motoru je výhodnější dřívější uzavření, aby nedocházelo k vytlačování směsi zpět do sacího potrubí. [16]

Variabilním časováním ventilů tak docílíme ideální výměny směsi dle aktuálních podmínek chodu motoru. Natáčením vačkové hřídele se dá posouvat fáze sání a tím i překrytí ventilů. Zdvih a doba otevření ventilů zůstává neměnná. Nastavení vačkové hřídele se mění podle předem definovaných vztahů zátěže a otáček. Při volnoběhu a při vysokých otáčkách je vačková hřídel sacích ventilů nastavena tak, že se sací ventil zavírá později. V tomto případě nedochází k překrývání s výfukovými ventily, což napomáhá stabilnímu chodu motoru ve volnoběžných otáčkách a dobrému využití výkonu při vysokých otáčkách. Na druhém konci při nízkých a středních otáčkách je vačková hřídel sacích ventilů nastavena tak, aby sací ventil zavíral dříve (mírné překrytí ventilů). Dosahuje se tím většího naplnění válců a zlepšení točivého momentu. [16]

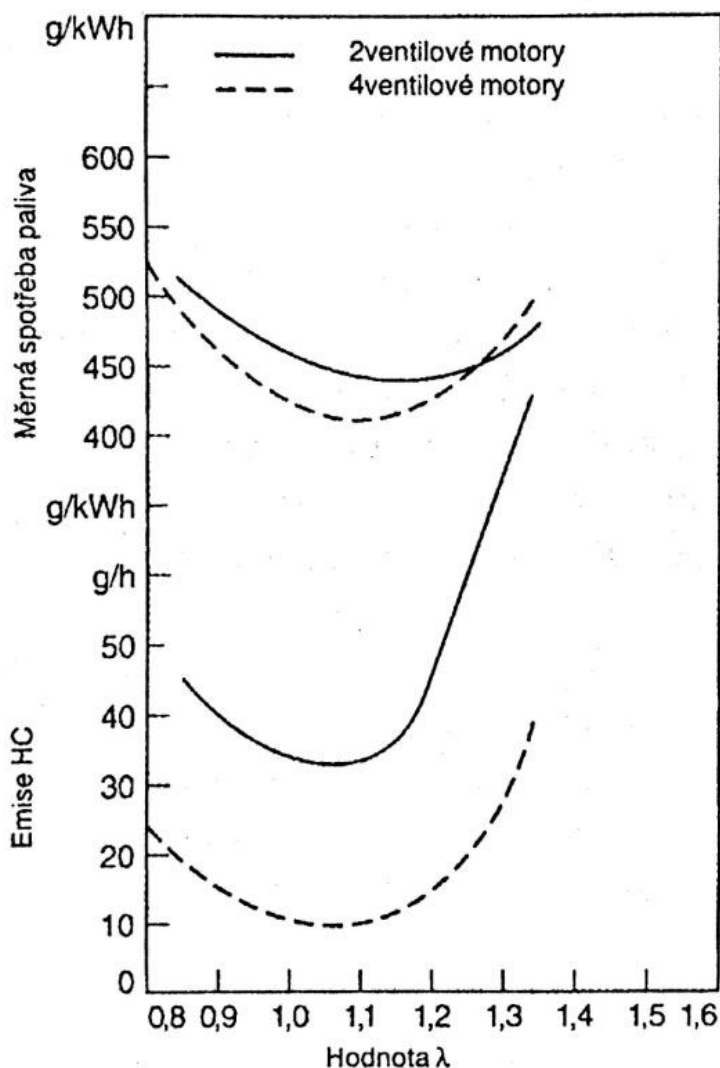


**Obr. 4.4.1** Schéma variabilního časování ventilů v závislosti na horní, dolní úvrati a natočení vačkové hřídele. [27]

*A1 - otevírání výfukového ventilu, A2 - zavírání výfukového ventilu; B1 - otevírání sacího ventilu, B2 - zavírání sacího ventilu; HÚ - horní úvrat', DÚ - dolní úvrat'*

Kvůli produkci nežádoucích škodlivin začíná být nahrazována technika dvou ventilů na válec za techniku čtyřventilovou. Tím se lze dosáhnout kompaktního rozměru spalovacího prostoru s centrální polohou svíčky a rovněž dochází i k příznivějšímu vyplachování válců. [1]





**Obr. 4.4.2** Snížení spotřeby paliva a škodlivin HC díky přechodu na čtyřventilovou techniku. [1]

## 4.5 USPOŘÁDÁNÍ SACÍHO SYSTÉMU

Průběh dobrého výplachu válců je dále ovlivněn uspořádáním sacího a výfukového systému. Sacími zdvihy pístu je vytvářeno v sacím potrubí periodické kolísání tlaku. Tyto tlakové vlny se šíří až na konec potrubí, kde jsou následně odraženy zpět. Vhodným uspořádáním délky sacího potrubí, přizpůsobenému časování ventilů způsobí, že odražená tlaková vlna dorazí k sacímu ventilu těsně před ukončením fáze sání. Tak se díky přetlaku dodá do válce větší množství čerstvé směsi. Obdobně tomu je i u výfukového potrubí. Pokud se tak podaří sladit sací a výfukové potrubí, aby při překrytí ventilů docházelo k pozitivnímu poklesu tlaku, dojde k příznivé změně plnění s pozitivním účinkem na emise výfukových plynů, výkon a spotřebu paliva. [1]



## 4.6 VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

Pro dobré spalování zážehových motorů je důležitá homogenní směs paliva a vzduchu. Pro přípravu směsi se dnes místo karburátorů používají vstřikovací systémy. Jejich výhodou je vstřikování paliva v souvislosti s požadavky na hospodárnost a nízký obsah škodlivých látek ve výfukových plynech. Vstřikování umožňuje přesné odměřování paliva v závislosti na provozním stavu a zatížení motoru při zohlednění okolních vlivů. Vstřikování dělíme na nepřímé a přímé. Kde u nepřímého dále rozlišujeme centrální (bodové) a vícebodové. [8]

### 4.6.1 NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

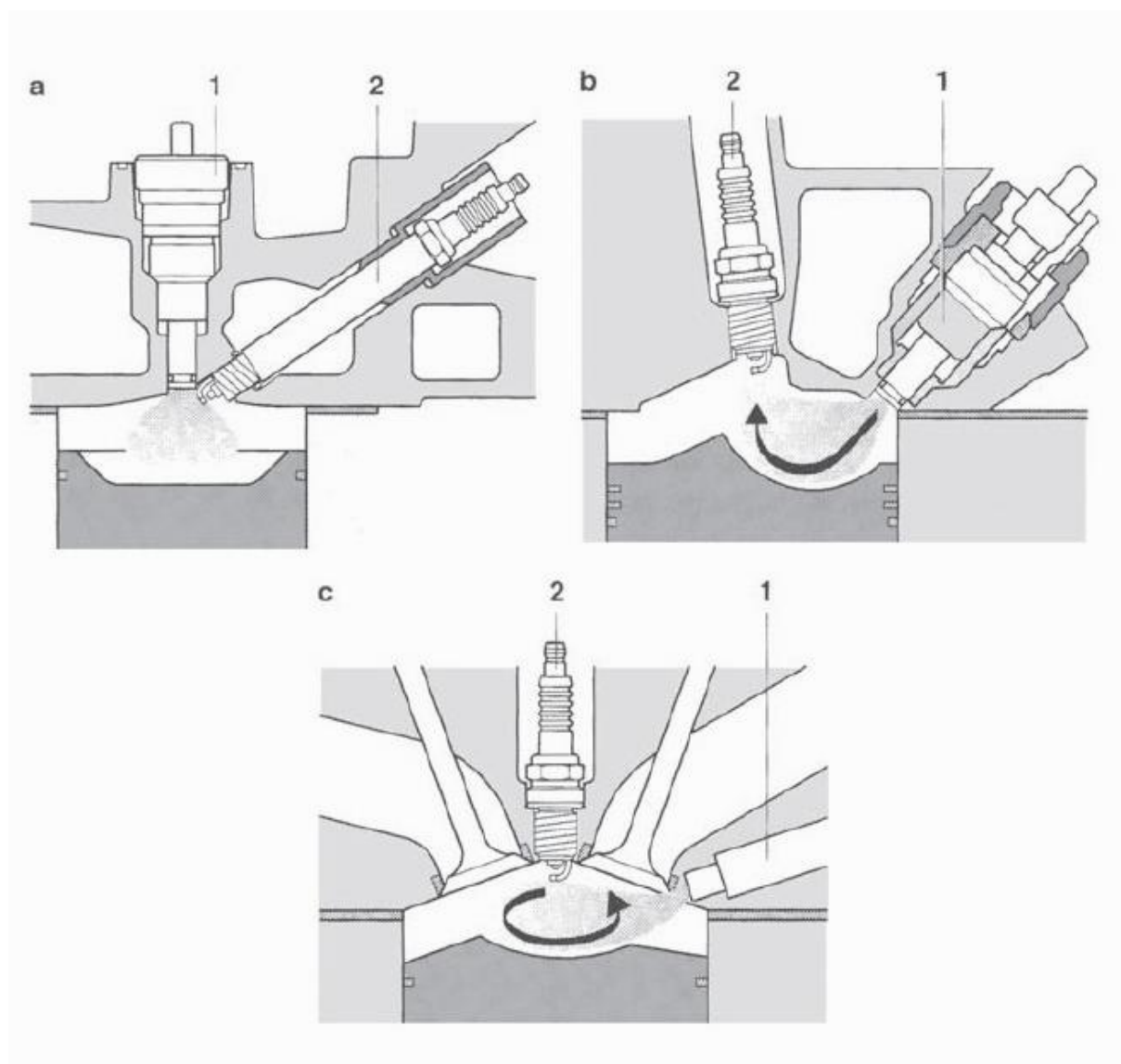
**Centrální vstřikování** benzínu (CFI = Central Fuel Injection) je elektronicky řízený vstřikovací systém, u kterého je palivo vstřikováno do sacího potrubí z jednoho ventilu na centrálním místě již před škrticí klapkou. Umístění ovládaného vstřikovacího ventilu odpovídá umístění karburátoru. Palivový paprsek trysky je nasměrován přímo do průtočných průřezů škrticí klapky. [8]

**Vícebodové vstřikování** benzínu (MPI = Multi Point Injection) má ideální předpoklady pro vznik homogenní směsi paliva a vzduchu. Každému válci je přiřazen jeden vstřikovací ventil, který rozprašuje palivo přímo před sací ventil příslušného válce. Při jeho otevření strhává proud nasávaného vzduchu obláčky palivových par a následujícím vířením v průběhu sací doby způsobuje tvorbu dobře zapalitelné směsi. Tím se zabezpečí rovnoměrné naplnění jednotlivých válců motoru palivem a odstraní kondenzace paliva na studených stěnách sacího potrubí za nízkých teplot. [8]

### 4.6.2 PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

U přímého vstřikování (obchodní označení např. GDI - Gasoline Direct Injection, nebo FSI - Fuel Stratified Injection) je benzin rozprašován přímo do spalovacího prostoru. Při malé zátěži motor pracuje v režimu s chudou směsí. Pro její zapálení musí být speciálně tvarované potrubí a hlava pístu, aby dokázaly dostatečně rozvířit nasávaný vzduch. Do něho se pak pod vysokým tlakem v oblasti kolem svíčky, těsně před završením druhé doby, vstříkne minimální potřebné množství paliva. To se ve válci rozvrství a kolem svíčky

se utvoří potřebná bohatá směs, která následně zapálí i zbytek chudší směsi. Jedná se o tzv. vrstvené plnění. Zato při vyšší zátěži se směšovací poměr snižuje a palivo je vstřikováno již během sání, čímž i ochlazuje válec. Zároveň se docílí tvorby homogenní směsi. Ve srovnání s nepřímým vstřikem paliva, tak lze docílit, v závislosti na otáčkách a zatížení, zvýšení výkonu a krouticího momentu spolu se snížením spotřeby paliva a redukce emisí  $\text{CO}_2$ . Na druhou stranu jsou u použití přímého vstřikování měřeny vyšší hodnoty škodlivin  $\text{NO}_x$  a nespálených uhlovodíků. [8, 22]

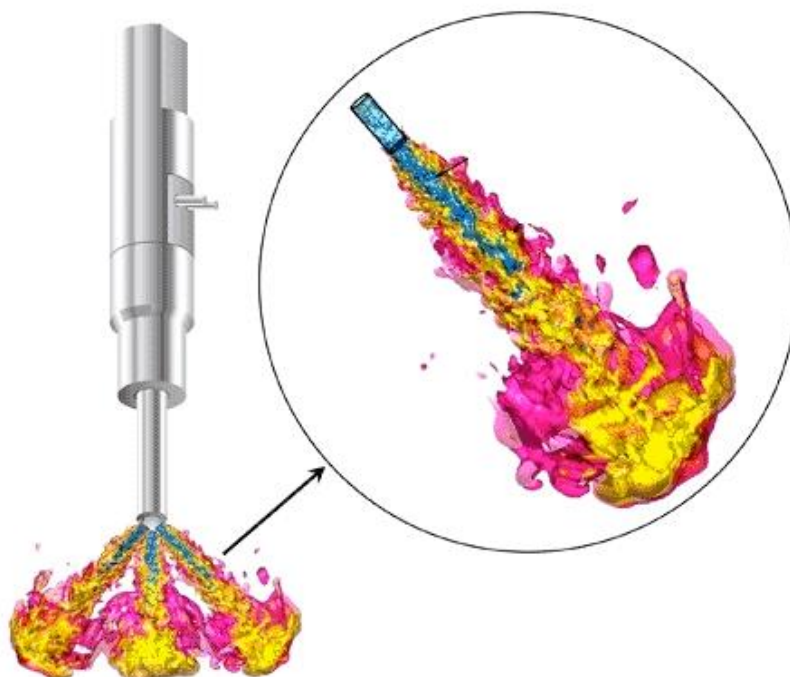


**Obr. 4.6.2** *Uspořádání spalovacího prostoru umožňující v kombinaci s přímým vstřikováním vrstvené plnění. [8]*

*a - spalování řízené paprskem, b - spalování řízené stěnou, c - spalování řízené vzduchem,  
1 - vstřikovací ventil, 2 - zapalovací svíčka*

#### 4.7 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ U VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

Konstrukcí vznětového spalovacího motoru je vyžadován velký vstřikovací tlak a přesné dávkování paliva. Jeden ze způsobů použití je systém čerpadlo – tryska, kde se čerpá palivo do vstřikovacího čerpadla, odkud se dopravuje přímo do mechanického vstřikovače, který se tlakem otevře a tak dojde k vstřiku paliva do válce. Druhým dnes běžným způsobem je použití systému common rail. Ten pracuje s tlakovým zásobníkem, ve kterém je tlak vytvářen nezávisle. Řídící jednotka pak určí požadovaný tlak a dobu otevření vstřiku, čímž docílí přesného množství paliva. V důsledku vysokého tlaku v závislosti na jízdní situaci common rail umožňuje dosáhnout až osmi vstřiků na jeden spalovací cyklus. Hlavními požadavky na vznik kvalitní směsi se vzduchem je zajištění vysokých vstřikovacích tlaků a velmi jemné rozprášení a okamžité odpaření paliva. Pro dosažení maximální účinnosti takového vstřiku se klade důraz na dokonalou atomizaci a rozprášení paliva, která nyní v oblasti vstřikování určuje trendy. Díky přesnému vstřikování je pak spalování ekonomičtější a motor produkuje nižší množství škodlivin než u předchozích druhů vstřikování a to až o 40 % emisí CO, 50 % HC a 60 % pevných částic. Snížením měrné spotřeby paliva dochází také k snížení produkce CO<sub>2</sub> až o 20 %. Kromě toho má motor i měkčí a tišší chod. [6]



*Obr. 4.7 Počítačová modelace rozprášení paliva u vznětových motorů. [28]*



## 4.8 SNIŽOVÁNÍ MECHANICKÝCH ZTRÁT

Hlavní zdroje mechanických ztrát jsou způsobené třením, dále jsou to pak ztráty způsobené výměnou náplně ve válci, pohonem rozvodů a dalších mechanismů, důležitých pro chod motoru. Tyto ztráty odebírají značnou část z výkonu motoru, což znamená, že se rovněž podílejí na produkci škodlivin ve výfukových plynech. [2]

**Tab. 4.8** Porovnání mechanických ztrát mezi zážehovým a vznětovým motorem v procentech ztrátového výkonu. [2]

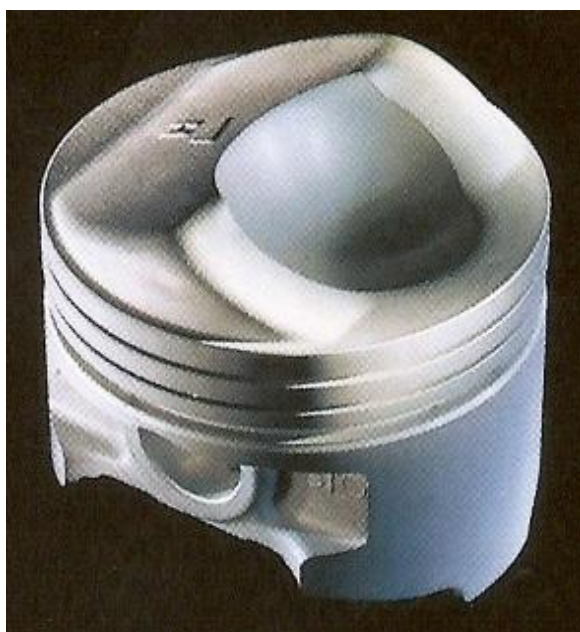
Druh mechanických ztrát	Zážehový motor	Vznětový motor
Tření mezi pístem s kroužky a válcem	45 %	50 %
Tření ložisek klikového a vačkového hřídele	23 %	24 %
Výměna náplně ve válci	20 %	14 %
Pohon rozvodového mechanismu	6 %	6 %
Pohon pomocných zařízení	6 %	6 %

Pohyb pístu s pístními kroužky má za následek až polovinu všech mechanických ztrát v motoru. Proto je hlavně kladen důraz na zvolení vhodných materiálů, mazání a povrchové úpravy jak pístu, tak i pístních kroužků a válce. Dále jsou to ložiska, které umožňují rotaci klikové a vačkové hřídele. Ta jsou vystavena velkému vnitřnímu tření, což způsobuje až čtvrtinu mechanických ztrát v motoru. Požadavek pro snížení ztrát výměny náplně ve válci, je především v optimalizaci a hladkosti sacího a výfukového potrubí. Bohužel ale nevyhnutelné ztráty způsobuje užití vzduchového filtru, katalyzátoru, tlumičů hluku a filtrů pevných částic. Rovněž důležitým prvkem je také, výše zmíněné vhodné nastavení časování ventilů. Rozvodový mechanismus je ovlivněn především ztrátami v přenosu pohybu válečkovým, nebo ozubeným řemenem, či čelním ozubeným soukolím. [3] Za pomocné mechanismy pak považujeme především čerpadla (vodní, olejové, vstřikovací, palivové), alternátor, klimatizaci, ventilátor a další. S rostoucími požadavky na komfort posádky, tak rostou i nároky na optimalizaci jednotlivých mechanismů, při zachování minimálních ztrát.



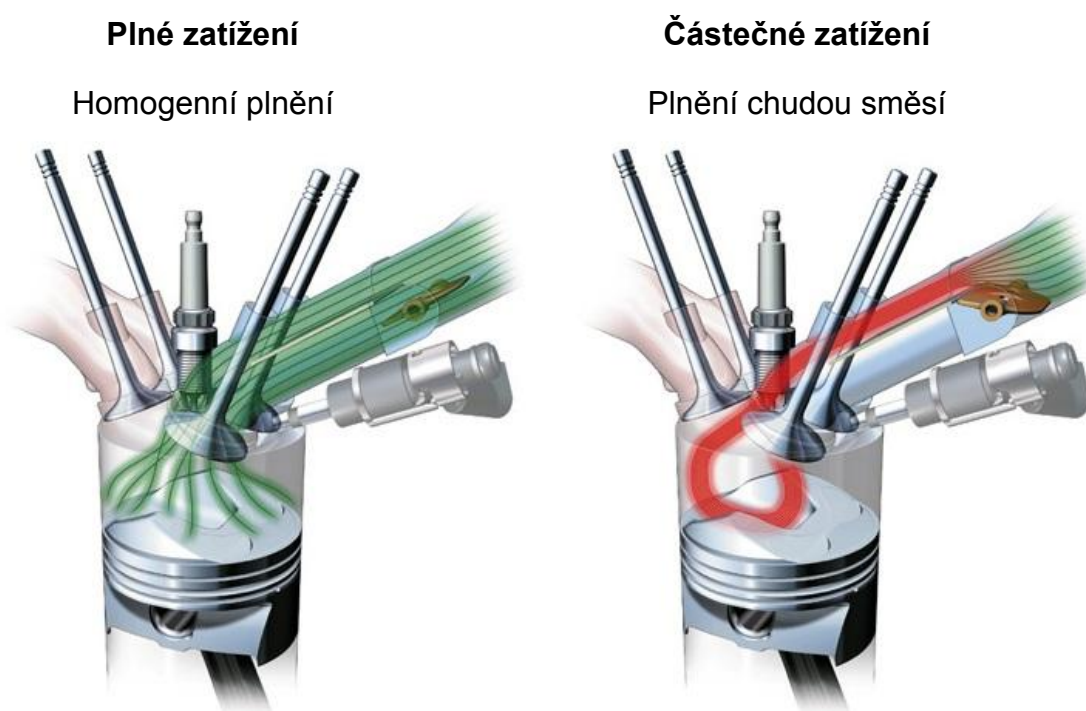
## 4.9 KONCEPCE CHUDÝCH SMĚSÍ

K nejlepšímu spálení benzínového paliva dojde při tzv. stechiometrickém poměru, což je poměr 1 kg paliva na 14,7 kg vzduchu (1:14,7) vyjádřeno součinitelem  $\lambda = 1$ . Spalovací motor v běžném provozu pracuje většinou pouze s částečným zatížením. Proto nepotřebuje k dosažení momentálního výkonu spalovat palivo s poměrem  $\lambda = 1$ . Nové technologie a metoda vrstveného plnění, tak umožňuje spalování s tzv. chudou směsí  $\lambda < 1$ . To znamená, že oproti stechiometrickému poměru je ve směsi přebytek vzduchu, což je výhodné především v rámci snížení spotřeby a emisí  $\text{CO}_2$ . Na druhé straně je problém ve formě přebytku vzduchu ve spalovacím procesu, který má za následek větší produkci škodlivin  $\text{NO}_x$ , které je nutno dále eliminovat. Homogenní bohatá směs  $\lambda > 1$  s přebytkem paliva se naopak využívá při velkém zatížení motoru, kdy je potřeba plného výkonu.

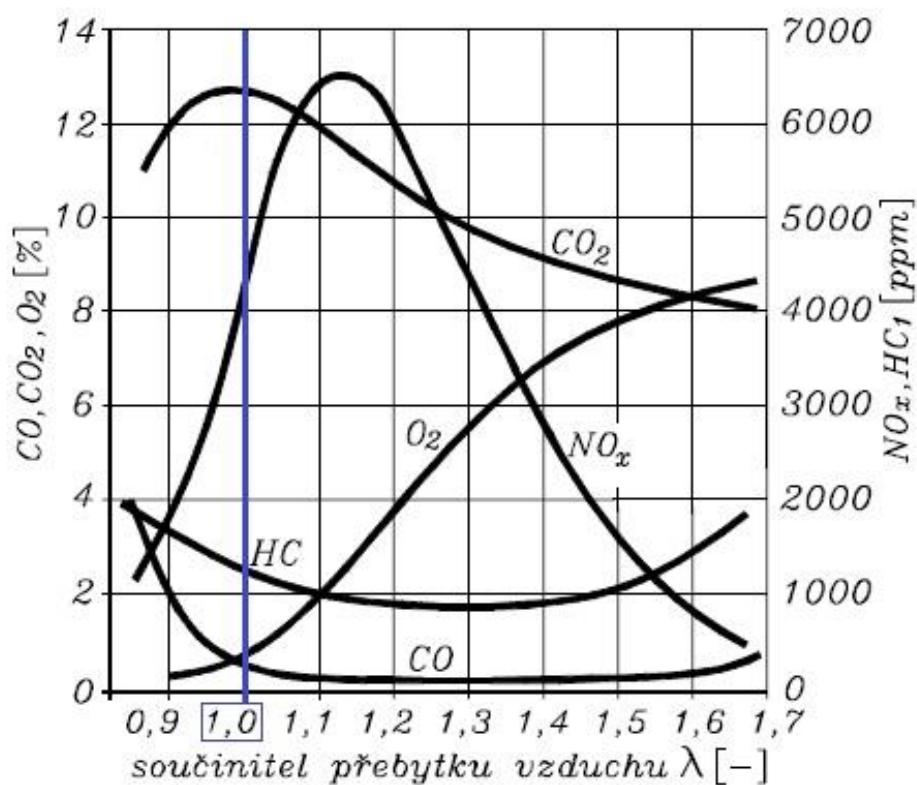


**Obr. 4.9.1** Speciální tvar pístu s deflektorem pro zážehové motory umožňující vrstvené plnění. [29]





**Obr. 4.9.2** Plnění spalovacího prostoru pomocí přímého vstřikování dle zatížení motoru. [30]



**Obr. 4.9.3** Závislost koncentrace škodlivin ve výfukových plynech na bohatosti spalované směsi u zážehového motoru. [9]



Z obr. 4.9.3 můžeme vidět, že při spalování bohaté směsi je ve spalinách větší koncentrace CO a HC než při spalování stechiometrické (modře označená oblast) nebo chudé směsi. Zato koncentrace NO<sub>x</sub> jsou maximální právě při spalování mírně chudé směsi. Z hlediska podílu škodlivin ve výfukových plynech je ideální provoz na stechiometrickou směs, na druhé straně je však při spalování chudé směsi zase menší spotřeba paliva a emise CO<sub>2</sub>. U maloobjemových motorů, s jejich relativně malou měrnou spotřebou je hlavní prioritou jednoduchost konstrukce a nízká pořizovací cena. Proto se u nich využívá spíše nepřímého vstřikování a provoz na stechiometrickou směs. U motorů, kde je kladen důraz na nízkou spotřebu paliva i za cenu vyšších pořizovacích nákladů je použit přímý vstřík paliva s možností spalování chudé směsi, kde je nezbytná dodatečná eliminace vzniklých škodlivin NO<sub>x</sub>, způsobující složitější konstrukci spalovacího agregátu.

#### **4.10 ZHODNOCENÍ METOD PRO SNÍŽENÍ VZNIKU ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH**

Ve snaze o nízkou produkci škodlivých látek ve výfukových plynech při zachování, či naopak zvýšení výkonu je velmi důležitý efektivní proces spalování a optimalizace motoru. Tato kombinace umožňuje eliminaci škodlivin již při jejich vzniku. Společným problémem je co zredukování mechanických ztrát, pro odlehčení zatížení motoru. Proto se začíná využívat rekuperace energie při brzdění, odpojování alternátoru, zvyšování efektivity chlazení motoru, klimatizace a další. Novým trendem se pak stává využití propojení technologií vznětového a zážehového motoru. Proto benzínové motory začínají využívat větších kompresních poměrů, pro zvýšení jejich účinnosti, využívají přímého vstřiku, který dovoluje chod jak na bohatou, tak i chudou směs. S tím je spojen problém tvaru spalovacího prostoru, který musí umožňovat dobré zapálení a následné hoření směsi. Obecně se konstruktéři snaží přizpůsobit aktuálnímu chodu a zatížení motoru, aby spotřeboval co nejméně paliva při malých emisích. S čímž rovněž souvisí variabilní ventilový systém poskytující různé režimy plnění. Všechny tyto prvky tak využívají oba pístové spalovací motory. Bohužel však jde většinou o balanc mezi výhodami a nevýhodami při použití dané technologie.





## 5 PASIVNÍ SNIŽOVÁNÍ ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH

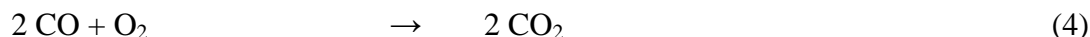
Druhá cesta pro snižování škodlivin je následná úprava nežádoucích již vzniklých emisí ve výfukových plynech. Tato metoda se zabývá konečnou a zásadní úpravou výfukových plynů před jejich vypuštěním do atmosféry. Hlavními prvky pro snížení nežádoucích škodlivin, které jsou dodatečně instalovány k spalovacímu motoru, tak jsou následující systémy, seřazené podle jejich nepostradatelnosti a důležitosti. O které lze říci, že je přímo úměrná historické aplikaci těchto systémů do motorových vozidel, bez nichž by výrobci nedokázali dále splňovat zpřísňující se exhalační normy. V první řadě je to tak katalyzátor a lambda regulace, recirkulace výfukových plynů, filtr pevných částic, nebo reakční činidlo, jehož použití je nutné u vznětových motorů pro splnění nadcházející normy Euro 6.

### 5.1 KATALYZÁTOR

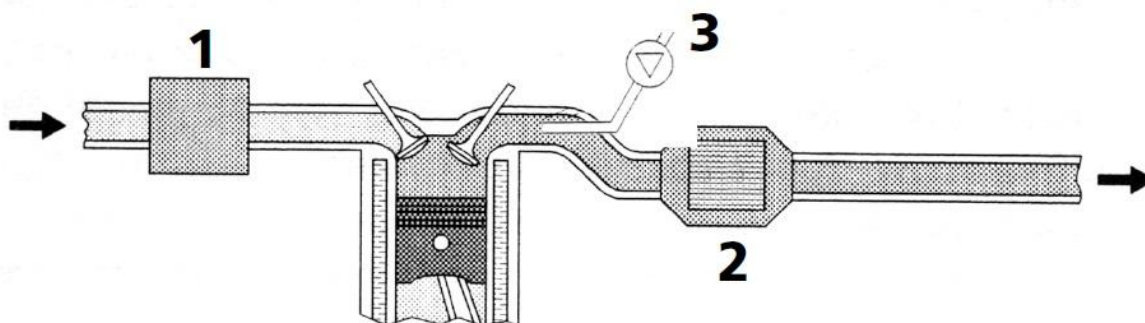
Katalyzátor (přesněji katalytický konvertor) je jeden z nejdůležitějších systémů pro snižování nežádoucích emisí, který umožňuje redukci škodlivin ve výfukových plynech až o 90%. Skládá se z keramických, nebo kovových nosičů (monolitů), na kterých je nanášena katalyticky účinná vrstva z ušlechtilých kovů, která umožňuje danou chemickou reakci pro přeměnu nežádoucích škodlivin na méně nebezpečné látky. Tato vrstva je u oxidačních katalyzátorů tvořena platinou a paladiem, nebo paladiem a rhodiem u třicestných katalyzátorů. Použití katalyzátoru vyžaduje použití bezolovnatého benzínu, který by jinak negativně ovlivnil katalytický účinek vzácných kovů. Katalyzátory lze pak podle účelu použití a koncepce snižování emisí rozdělit do čtyř skupin na oxidační, dvoukomorové, třicestné a SCR katalyzátory.

#### 5.1.1 OXIDAČNÍ KATALYZÁTOR

Oxidační katalyzátor (dvousložkový) snižuje ve výfukových plynech koncentrace nespálených uhlovodíků HC a oxidu uhelnatého CO, ke snížení oxidu dusíku prakticky nedochází. Katalyzátor pracuje s přebytkem vzduchu a přeměňuje tak pomocí oxidace HC a CO na vodní páru  $H_2O$  a oxid uhličitý  $CO_2$ . Oxidační reakce popisují následující schematické rovnice.



Potřebný kyslík k uskutečnění reakcí je zajištěn provozem motoru na chudou směs, tj. s přebytkem vzduchu ( $\lambda > 1$ ). S touto koncepcí směsi pracují především vznětové motory, u kterých je proto výhodné použití právě oxidačního katalyzátoru. Jinak je nutné přídavné dodávání tzv. sekundárního vzduchu. [9, 13]

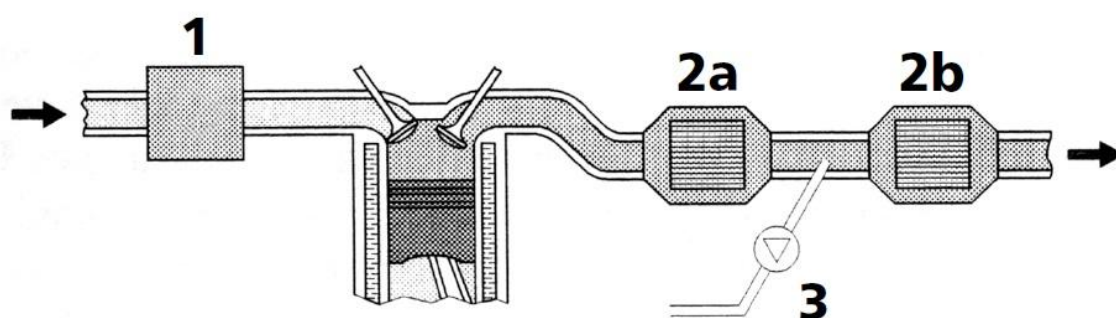
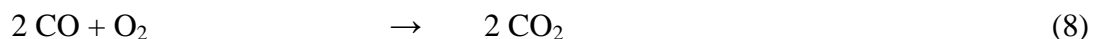
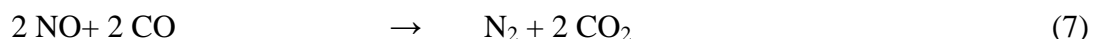


**Obr 5.1.1** Schéma jednokomorového oxidačního katalyzátoru. [1]

1 - příprava směsi, 2- oxidační katalyzátor (HC, CO), 3 - sekundární vzduch

### 5.1.2 DVOUKOMOROVÝ KATALYZÁTOR

Dvoukomorový katalyzátor se skládá ze dvou za sebou řazených katalyzátorů. Na rozdíl od oxidačního musí být motor poháněn bohatou směsí, tj. s přebytkem paliva ( $\lambda < 1$ ), což má vliv na nepříznivou spotřebu paliva, na druhou stranu však může být realizován s jednoduchým systémem přípravy směsi bez elektronického řízení. Při takovémto systému nejdříve proudí výfukové plyny přes redukční katalyzátor, za ním dochází k přifukování vzduchu a následně procházejí přes katalyzátor oxidační. V prvním katalyzátoru jsou přeměněny oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  a ve druhém pak nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý. Nevýhodou je ale vznik amoniaku  $\text{NH}_3$ , který vzniká při redukci oxidů dusíku za nedostatku vzduchu, a poté vznik oxidů dusíku díky následnému dodání vzduchu a oxidačnímu procesu. Další nevýhodou je pak výrazně horší redukce nežádoucích škodlivin  $\text{NO}_x$  ve srovnání s účinnějším jednokomorovým třicestným katalyzátorem s lambda regulací, což je hlavní důvod k nízké četnosti používání dvoukomorového katalyzátoru. [1]

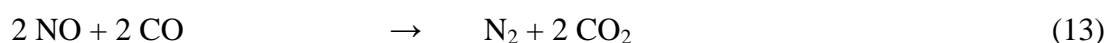
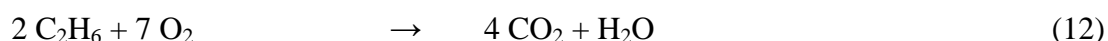
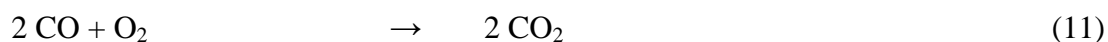
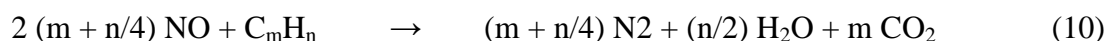


**Obr 5.1.2** Schéma dvoukomorového katalyzátoru. [1]

*1 - příprava směsi, 2a - redukční katalyzátor ( $\text{NO}_x$ ), 2b - oxidační katalyzátor ( $\text{HC}$ ,  $\text{CO}$ ),  
4 - sekundární vzduch*

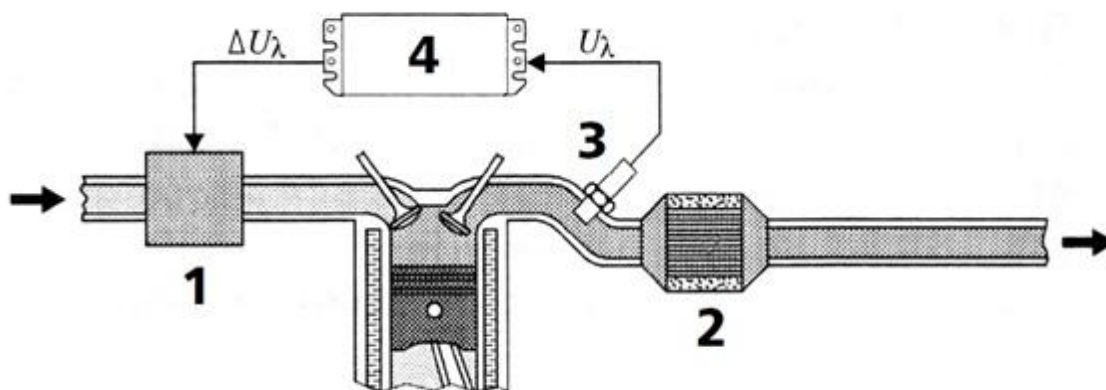
### 5.1.3 TŘÍCESTNÝ KATALYZÁTOR A LAMBDA REGULACE

Třícestný, neboli tříložkový/trojčinný katalyzátor výrazně snižuje všechny tři škodlivé složky  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  a  $\text{NO}_x$  zároveň. Uskutečňuje tak redukčně - oxidační chemickou reakci, probíhající ve spalínách při jejich průtoku úzkými průřezy s pórovitým povrchem, nasyceným vzácnými kovy platinou a rhodiem s katalytickými účinky. Díky tomu probíhají následující schematické chemické rovnice.



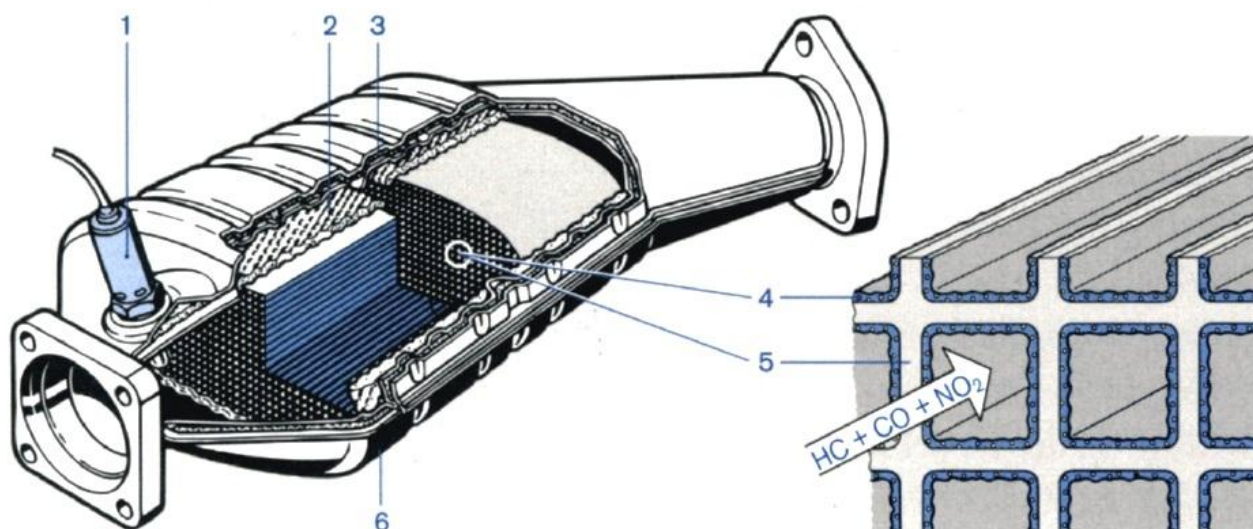
Podmínkou vysoké účinnosti katalyzátoru je udržení hodnoty  $\lambda$  v rozmezí 0,99 - 1,002 v tzv. lambda oknu. Tudíž se tohoto katalyzátoru využívá především u zážehových motorů, které většinou pracují právě se stechiometrickou směsí ( $\lambda = 1$ ). Toto velmi malé přípustné rozmezí je i pro moderní systémy vstřikování velmi obtížné udržet při všech provozních režimech motoru. Proto se používá tzv. lambda regulace, která má za úkol pomocí uzavřeného regulačního okruhu stálé udržení složení směsi paliva a vzduchu právě v optimální oblasti (lambda okně). Lambda sonda je umístěna v proudu výfukových plynů před katalyzátorem (popř. druhá za katalyzátorem) a měří obsah kyslíku. Řídicí jednotka pak vytváří ze signálu měřiče váhy vzduchu a ze signálu lambda sondy faktor, s jehož pomocí lze optimalizovat dobu vstřiku a zajistit tak potřebnou směs paliva. Při jakékoliv odchylce  $\lambda$  mimo toto rozmezí účinnost katalyzátoru výrazně klesá.

U čtyřdobého zážehového motoru lze pomocí třicestného katalyzátoru při správném seřízení bohatosti směsi dosáhnout relativně vysoké účinnosti redukce škodlivých výfukových plynů. U oxidů dusíku  $\text{NO}_x$  to je až 99 %, u nespálených uhlovodíků HC se hodnoty pohybují od 70 do 90 % a u oxidu uhelnatého CO je to 95 %, jedná se tak o nejúčinnější systém snižování nežádoucích emisí. Důležitým faktorem pro udržení efektivity a životnosti katalyzátoru je potřebná vysoká čistota paliva. Přítomnost síry, fosforu, chloru či těžkých kovů pro něj představuje značný negativní dopad, především ve výrazném poklesu jeho účinnosti. Dále je pak jeho spolehlivá funkce z hlediska životnosti podmíněna udržením nejvyšších teplot uvnitř katalyzátoru pod hranicí 1000 °C, kdy může snadno dojít k poškození monolitů, na kterých jsou naneseny katalytické materiály. [1, 9]



**Obr 5.1.3.1** Schéma jednokomorového třicestného katalyzátoru. [1]

1 - příprava směsi, 2 - třicestný katalyzátor ( $\text{NO}_x$ , HC, CO), 3 - lambda sonda, 4 - řídicí jednotka,  
 $U_\lambda$  - napětí sondy,  $\Delta U_\lambda$  - řídicí napětí ventilu



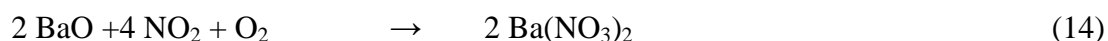
**Obr. 5.1.3.2** Konstrukce trojcestného katalytického konvertoru. [1]

1 - lambda sonda, 2 - pružná drátěná síť, 3 - tepelně izolační dvojitý plášť, 4 - povrstvení z platiny a rhodia, 5 - keramický nebo kovový nosič, 6 - obal

#### 5.1.4 ZÁSOBNÍKOVÝ KATALYZÁTOR

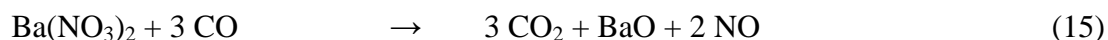
Zásobníkový, neboli  $\text{NO}_x$  katalyzátor se používá u motoru, které mají přímé vstřikování a fungují na chudou směs. Při takovém provozu nedokáže třicestný katalyzátor zcela převádět oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  vznikající při spalování. Typické zásobníkové katalyzátory obsahují oxidy draslíku, vápníku, stroncia a především oxidy barya. Konverze oxidů dusíku neprobíhá kontinuálně, ale ve třech stupních: ukládání  $\text{NO}_x$ , uvolnění  $\text{NO}_x$  a konverze. Nejdříve katalyzátor ukládá  $\text{NO}_x$  do zásobníku. Za přítomnosti kyslíku, obsaženého ve spalínách po spálení chudých směsí, je zásobníkový katalyzátor schopen na svém povrchu nashromáždit oxidy dusíku ve formě dusičnanů. Jakmile jsou však jeho akumulární možnosti vyčerpány, musí být regenerován. To se provede krátkodobým přepnutím na provoz s bohatou homogenní směsí, přičemž jsou dusičnany redukovány hlavně pomocí CO na dusík. Zásobníkový se plní zhruba po 30 až 60 sekundách a jeho regenerace trvá 1 až 2 sekundy. [1, 8]

Příklad ukládání oxidu dusičitého  $\text{NO}_2$  za pomoci oxidu barnatého BaO na dusičnan barnatý  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ .

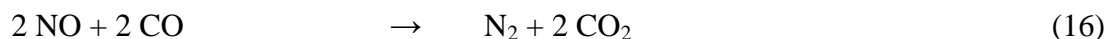




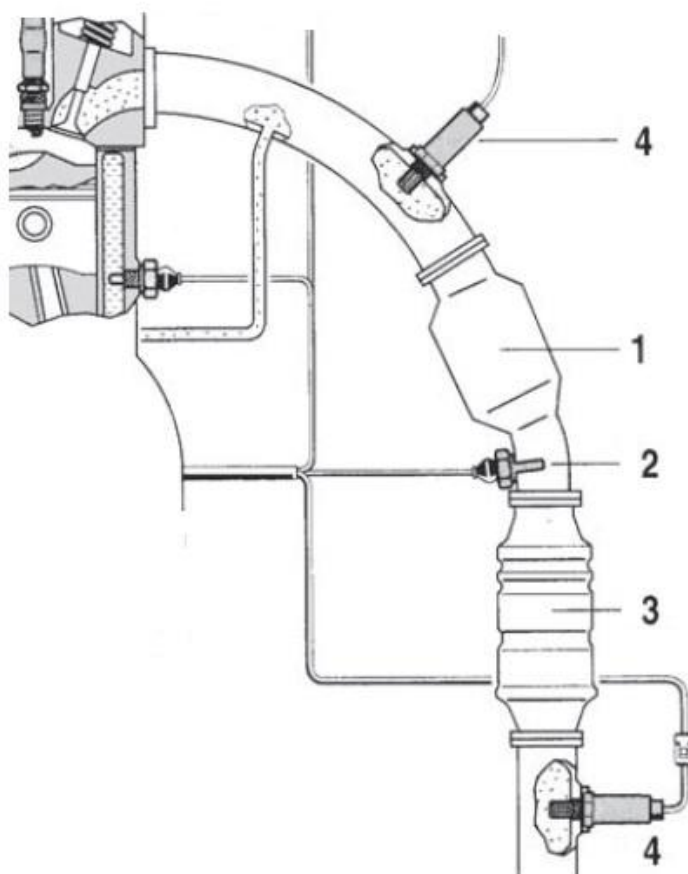
Následné uvolnění  $\text{NO}_x$  probíhající reakcí oxidu uhelnatého CO s dusičnanem barnatým  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  na vniklý oxid barnatý BaO, oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  a oxid dusnatý NO.



A konečná redukce  $\text{NO}_x$  v režimu regenerace s bohatou směsí, kdy oxid dusnatý NO reaguje s oxidem uhelnatým CO na dusík  $\text{N}_2$  a oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ .



Ukládací schopnost zásobníkového katalyzátoru pak výrazně závisí na teplotě, kdy maxima dosahuje přibližně mezi 300 a 400 °C. Proto je vhodná teplotní oblast mnohem nižší než u třícestného katalyzátoru. Z toho důvodu se musí pro katalytické čištění výfukových plynů používat dva oddělené katalyzátory, jeden poblíž motoru třícestný předřadný katalyzátor a jeden zásobníkový hlavní katalyzátor  $\text{NO}_x$  umístěný dále od motoru. [1]



**Obr. 5.1.4** Schéma umístění  $\text{NO}_x$  katalyzátoru. [1]

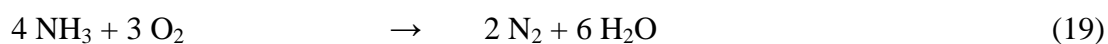
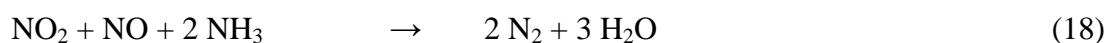
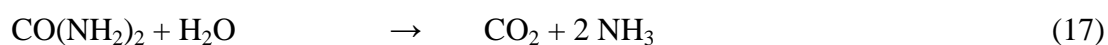
1 - trojcestný katalyzátor, 2 - snímač teploty výfukových plynů, 3 -  $\text{NO}_x$  katalyzátor,  
4 - lambda sonda



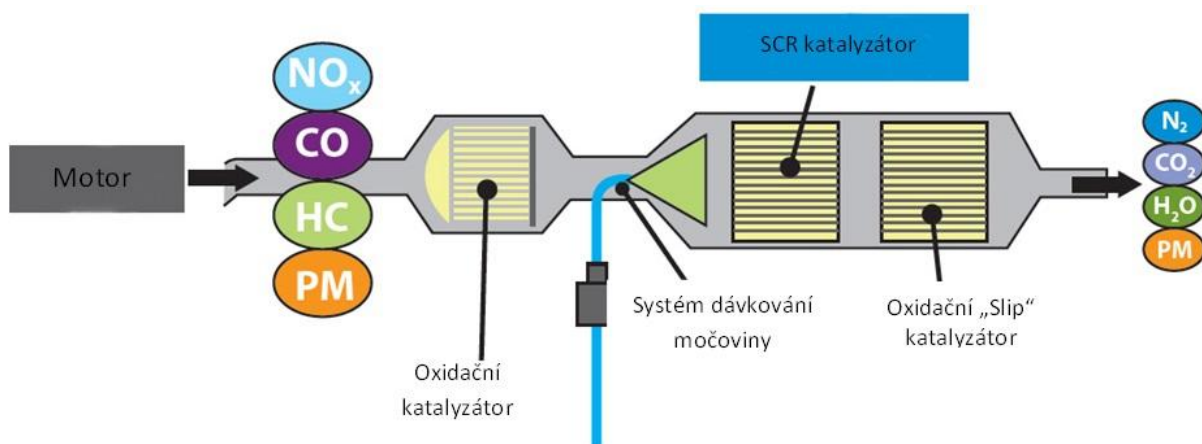


### 5.1.5 SELEKTIVNÍ KATALYZÁTOR

Selektivní katalyzátor rovněž znám pod označením SCR katalyzátor (z angl. označení Selective catalytic reduction) je systém určený pro snižování obsahu  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech. Nejdříve byl systém používán u zemědělských a nákladních vozidel, které jsou provozovány v dlouhodobě ustálených režimech zatížení. S příchodem stále zpřísněujících se exhalačních norem jsou ale výrobci nuceni instalovat tuto techniku i do osobních automobilů. Selektivního katalyzátoru se využívá u vznětových motorů, které díky své koncepci spalování chudé směsi využívají oxidační katalyzátor. Ten ale nedokáže potlačit nežádoucí emise oxidy dusíku, proto je nutno použití obou systému zapojených za sebou. Redukce oxidů dusíku probíhá pomocí vstřikování aditiva – vodního roztoku močoviny, obchodním názvem AdBlue do výfukového potrubí, kde chemicky reaguje na amoniak  $\text{NH}_3$ , který se poté v selektivním katalyzátoru spolu s oxidy dusíku přeměňuje na dusík a vodní páru. Kapalina AdBlue je složena z 32,5 % z močoviny  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  a zbylou částí z demineralizované vody, která se po vstříknutí odpaří a využije dále při chemických reakcích.



K zajištění dostatečné účinnosti redukce oxidů dusíku, která dosahuje až 90 % se musí teplota spalin pohybovat v rozmezí 350 - 420 °C. Dále je nutná kontrola zbytku amoniaku  $\text{NH}_3$  za katalyzátorem, který se vyskytuje v průběhu chemických reakcí, neboť jeho případný úniku do ovzduší je nežádoucí. O to se stará dodatečný systém tzv. slip katalyzátor, který mění zbytkový amoniak za pomoci kyslíku na dusík a vodní páru. [5, 9, 17, 18]



*Obr. 5.1.5 Schéma oxidačního a selektivního katalyzátoru u vznětového motoru. [5]*

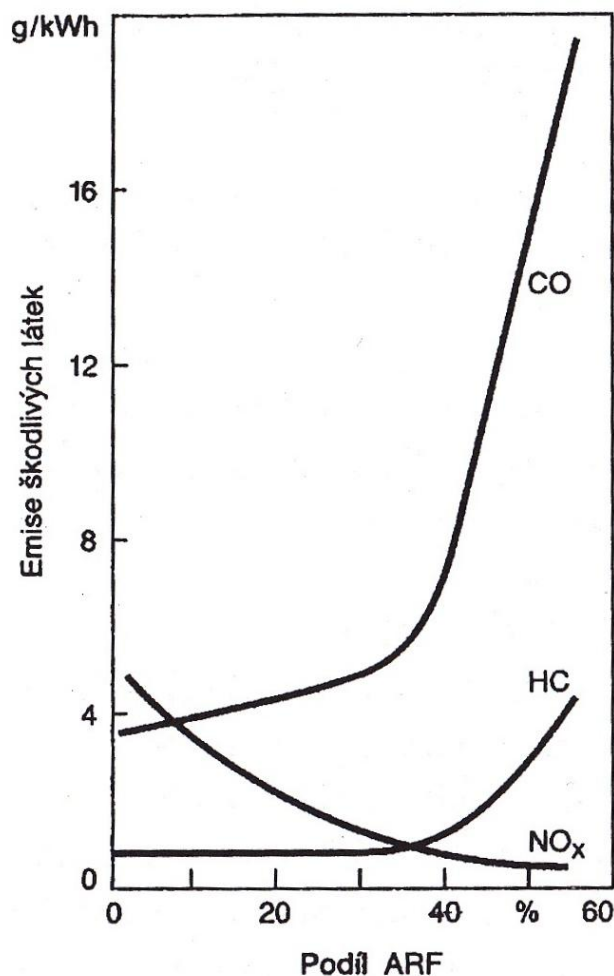
## 5.2 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Recirkulace výfukových plynů slouží ke snížení emisí  $\text{NO}_x$ , kde se jejich vznik potlačuje již během spalování. Recirkulaci dělíme na vnitřní a vnější. Vnitřní recirkulace je dána reziduálními (zbytkovými) plyny. Samovolně nastává u změny tlaků při výměně obsahu válce. Ovlivnit ji lze zejména systémem variabilní časování ventilů, který má vliv právě na množství zbytkových plynů zůstávajících ve válci a tím i podíl inertních plynů v náplni válce.

Většího ovlivnění podílu inertních plynů je však možno dosáhnout vnější recirkulací spalin pomocí tzv. EGR ventilu (z angl. exhaust gas recirculation, popř. AGR z něm. Abgasrückführung). Tuto techniku využívají hlavně vznětové motory, ale nyní také i motory s přímým vstřikováním benzínu.

Recirkulace výfukových spalin je tak založena na vrácení již vzniklých výfukových plynů zpět do sání. Tam se výfukové plyny mísí s čerstvě přiváděným vzduchem. Díky tomu se zmenšuje koncentrace kyslíku ve směsi, čímž se snižuje rychlost hoření a nejvyšší teplota na čele plamene. S tím zároveň klesá i maximální teplota spalování. Ta totiž hraje důležitou roli při tvorbě  $\text{NO}_x$ , která exponenciálně roste s teplotou, proto již malé snížení teploty spalování má značný vliv na produkci těchto škodlivin.





**Obr. 5.2.1** Vliv podílu recirkulovaných výfukových plynů na tvorbu škodlivých látek. [1]

Z obr. 5.2.1 můžeme vidět, že do určité meze působí pozitivně na redukci škodlivin NO<sub>x</sub> zvyšování podílu zbytkových plynů. Při jejím překročení však vede podíl zbytkových spalin ve směsi k nedokonalému spalování a tím k nárůstu emisí HC, CO a pevných částic, zvýšení spotřeby paliva a neklidnosti běhu motoru. Proto hovoříme o efektivním podílu recirkulovaných plynů do hodnoty 40 %.

Regulace podílu zpětného vedení výfukových plynů se usměrňuje řídicí jednotkou pomocí ventilu, který je v současné době většinou ovládán elektronicky pomocí krokového motoru. Podíl regulace pak závisí na teplotě motoru, plnicím tlaku, teplotě nasávaného vzduchu, zatížení motoru, či počtu otáček.



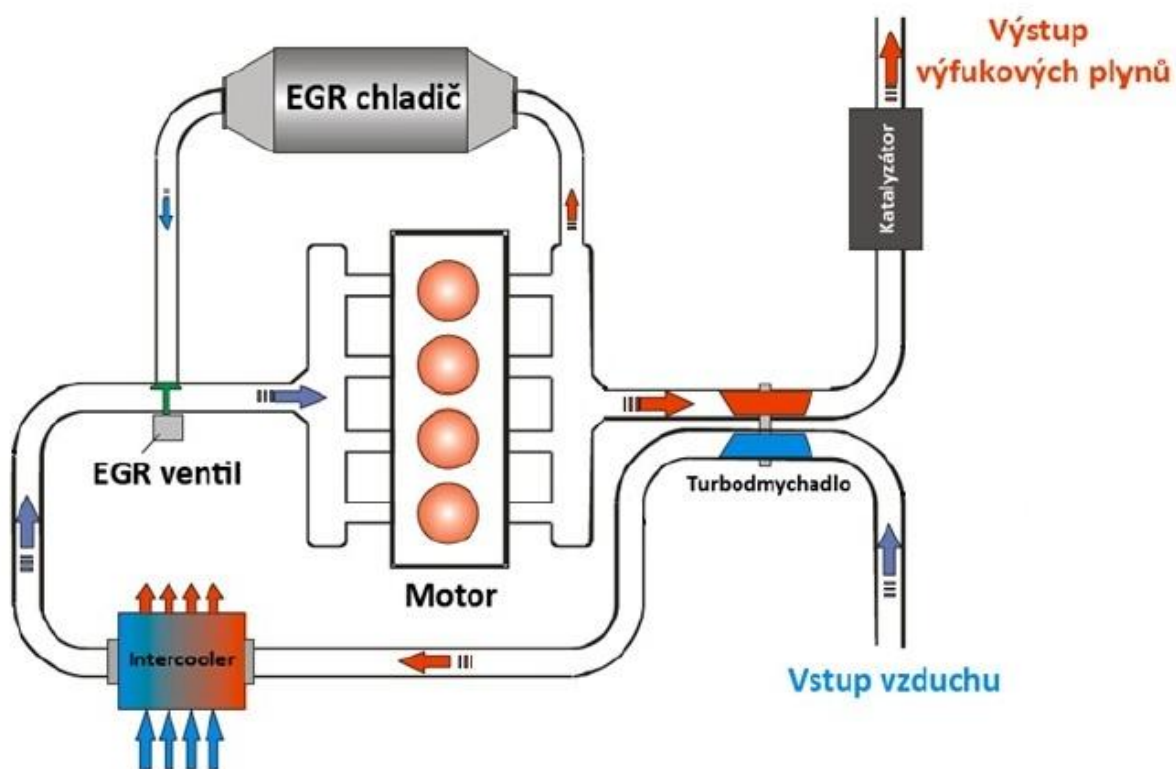
**Obr. 5.2.2** Pneumatický EGR ventil. [31]



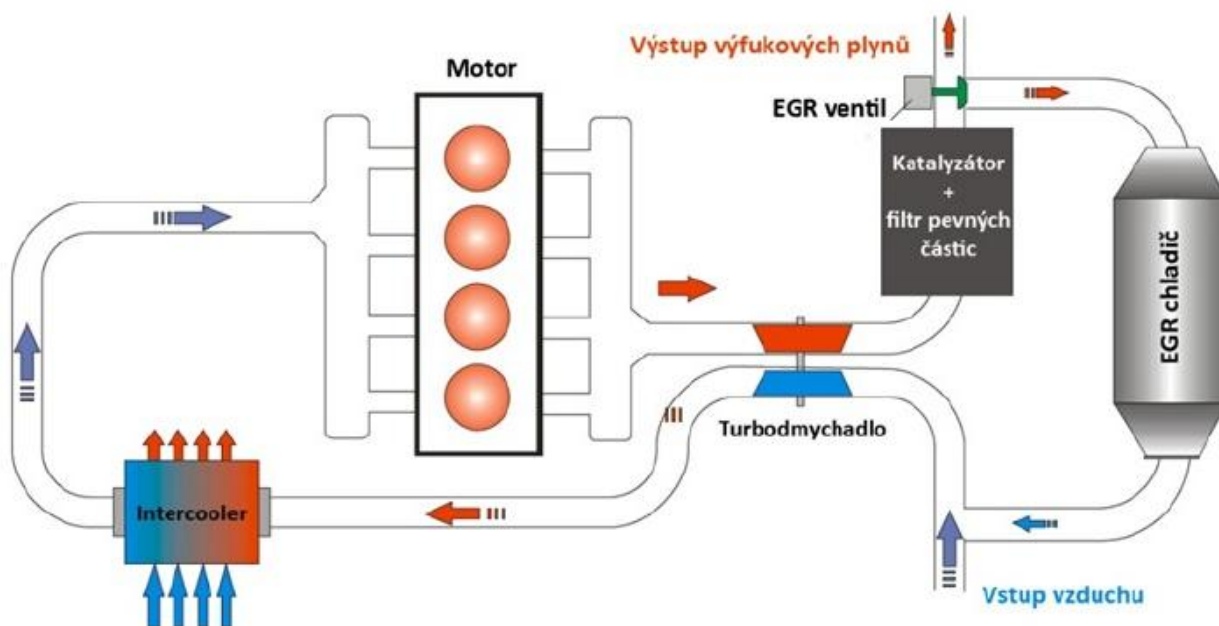
**Obr. 5.2.3** Elektromagnetický EGR ventil. [32]

Zefektivněním systému EGR můžeme docílit chlazením zpětně přiváděných výfukových plynů, čímž lze zvýšit jejich podíl při tvorbě směsi a zároveň snížit teplotu spalování, což je žádoucí pro redukci škodlivin  $\text{NO}_x$ . Sekundárně se tímto procesem zvýší i tlaky ve spalovací komoře, které umožní výrazné snížení exhalací pevných částic.

Vnější recirkulaci výfukových plynů dále můžeme rozdělit na vysokotlakou a nízkotlakou. Vysokotlaký systém je nyní nejpoužívanější díky jeho jednodušší konstrukci. Ta odvádí výfukové plyny takřka hned po opuštění spalovacího prostoru s EGR ventilem umístěným v sacím potrubí. Nízkotlaký systém vrací výfukové spaliny až po jejich průchodu katalyzátory a filtrem pevných částic s EGR ventilem umístěným ve výfukovém potrubí. Spaliny jsou tak zbaveny velkého podílu škodlivin, limitem však je nedostatečný tlakový spád. Zpříšňující se exhalační normy nastavují trend kombinace obou těchto systémů pro maximální efektivitu recirkulace výfukových plynů při různém zatížení motoru. [1, 4, 5]



Obr. 5.2.4 Schéma vysokotlakého systému EGR. [5]



Obr. 5.2.5 Schéma nízkotlakého systému EGR. [5]

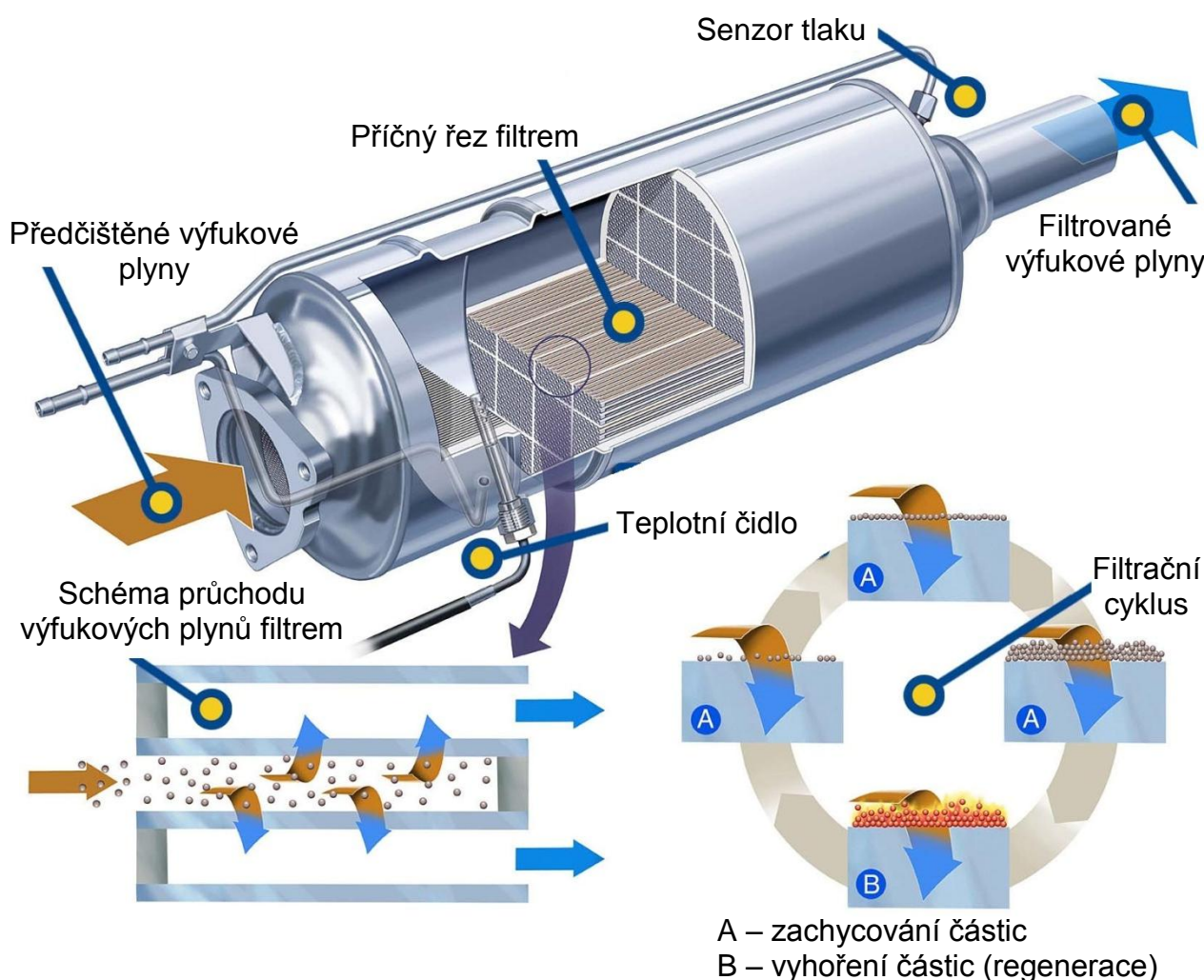


### 5.3 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

Filtr pevných částic DPF (z něm. Diesel particulate filter, nebo FAP z franc. Filtre a particules) je především záležitostí vznětových motorů, nicméně s očekávanými zpřísnujícími se exhalačními normami se do budoucna počítá se zavedením tohoto systému i do zážehových agregátů. Ty totiž začínají využívat techniku charakteristickou pro dieselové motory jako je přímý vstřik paliva a provoz na chudou směs. Zatím se však na zážehové jednotky regulace pevných částic PM v rámci norem Euro nevztahuje. Pro plnění emisních norem Euro 4 a 5 se začaly filtry pevných částic stávat nezbytnou součástí u vznětových motorů. Ty mají ve svých výfukových plynech velký obsah karcinogenních mikročástic, které nelze odbourat pomocí klasického katalyzátoru. Filtr pevných částic tak dokáže zachytit více jak 95 % těchto uhlíkových karcinogenních mikročástic. Jako první v roce 2000 s tímto zařízením přišel koncern PSA Peugeot Citroen (Peugeot société anonyme).

Filtr pevných částic tvoří keramické jádro s voštinovou strukturou složenou z karbidu křemíku. Filtrem tak proudí výfukové plyny skrze pórovitou keramickou stěnu, na niž jsou pevné částice zachycovány. Po určité době, závislé na provozu a zatížení motoru dochází k regeneraci filtru, která zabraňuje jeho zanesení a ucpání díky vyhoření zachycených pevných částic, které jsou spáleny a přeměněny na oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ . Tento automatický proces trvá jen několik minut a nijak neovlivňuje vnější projev motoru. Vlastní proces spalování pevných částic se děje při teplotách 600 – 650 °C. Takových teplot však dosahují spaliny u vznětových motorů jen při jejich velkém zatížení. Proto je dosažení zápalné teploty řešeno dvěma způsoby. První možností je systém s přidavným aditivem, který ho automaticky dává při každém dotankování přímo do palivové nádrže. Aditivum vystačí přibližně na 100.000 km, poté je doplněno v příslušném autoservisu. Tento systém je používán hlavně u francouzských výrobců. Druhou možností je systém bez aditiva, u kterého pak rozlišujeme dva režimy regenerace. **Pasivní regenerace** nastává při dlouhodobějším zatížení motoru, například při jízdě na dálnici, kdy teploty výfukových plynů dosahují 350 - 500 °C. Takto dochází přirozeně katalytickým spalováním k přeměně zachycených pevných částic na  $\text{CO}_2$ . Pokud však vozidlo neuvedeme do režimu, kdy je možno pasivní regenerace a filtr pevných částic začíná být ucpáný, dochází k **aktivní regeneraci**. Ta nastává podle zatížení motoru zhruba po 1.000 ujetých kilometrech prostřednictvím krátkodobé změny spalovacího procesu, pomocí které je zvýšena teplota výfukových plynů až na 600 °C, tak dojde k dostatečnému

spálení zachycených částic ve filtru. Dlouhodobým problémem však zůstává jeho životnost, kterou omezuje hromadění zbytkového popela a samotný provoz vozidla. [19]



*Obr. 5.3 Schéma filtru pevných částic DPF. [33]*

### 5.3.1 ADITIVA DO PALIVA PRO SNÍŽENÍ OBSAHU PEVNÝCH ČÁSTIC

Na trhu se nyní vyskytují dodatečné přísady do paliva, které umožňují snížení obsahu pevných částic. Existují dva druhy aditiv. Oba tyto přípravky jsou vhodné pro odlehčení práce a následnou delší životnost filtru pevných částic a to hlavně u automobilů provozovaných ve městech. Vůz se totiž v městském cyklu většinou nedostane do podmínek pro pasivní, či aktivní regeneraci filtru a to buďto z časových důvodů nebo nedostatečné vypalovací





teploty. Což způsobuje jeho nežádoucí dlouhodobé zanášení. První používané aditivum zkvalitňuje po chemické stránce běžně dostupné palivo (diesel) na čerpacích stanicích, čímž způsobuje účinnější spalování směsi a snižuje tak tvorbu sazí. Druhé přídatné aditivum do paliva se používá jako pomoc při regeneraci systému filtru pevných částic. Aditivum svým chemickým složením snižuje teploty hoření sazí, takže na jejich vypálení z filtru není potřeba standardní teplota výfukových plynů, která se pohybuje kolem 650 °C, ale stačí přibližně teplota 350 °C.

#### **5.4 ZHODNOCENÍ DODATEČNÝCH ÚPRAV PRO SNÍŽENÍ ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH**

Pro splnění radikálně se zpřísnujících exhalačních norem jsou výrobci automobilů tlačeni do používání těchto externích dodatečných systémů, které umožňují dostatečnou redukci podílu škodlivin ve výfukových plynech. Za takřka základní systém lze považovat katalyzátor, jak už třicetý s lambda regulací pro benzínové motory, tak oxidační pro dieselové motory. Dále se pro snížení škodlivin NO<sub>x</sub> aplikuje recirkulace výfukových plynů, ze začátku pro vznětové a později i pro zážehové motory. Normy Euro 4 a 5 se poté zaměřují především na vznětové motory, kdy bylo cílem ještě více snížit podíl škodlivin NO<sub>x</sub> a hlavně radikálně zredukovat množství PM. Proto se začínaly aplikovat filtry pevných částic, které umožní snížit toto množství až o 80 %. Poslední příchozí norma Euro 6 reguluje množství škodlivin NO<sub>x</sub> u dieselových motorů, kdy je nutné pro toto snížení zavádět do výfukového systému NO<sub>x</sub> zásobníkový katalyzátor, nebo selektivní katalyzátor se vstřikováním aditiva. Další snižování podílu škodlivých emisí ve výfukových plynech bude zřejmě čekat benzínové motory, které pro snížení spotřeby a produkci CO<sub>2</sub> začínají využívat technologie charakteristické pro dieselové motory, s nimiž plynou i nevýhody v rámci produkci nežádoucích škodlivin. Proto lze díky příští exhalační normě očekávat například regulaci pevných částic i u zážehových motorů.

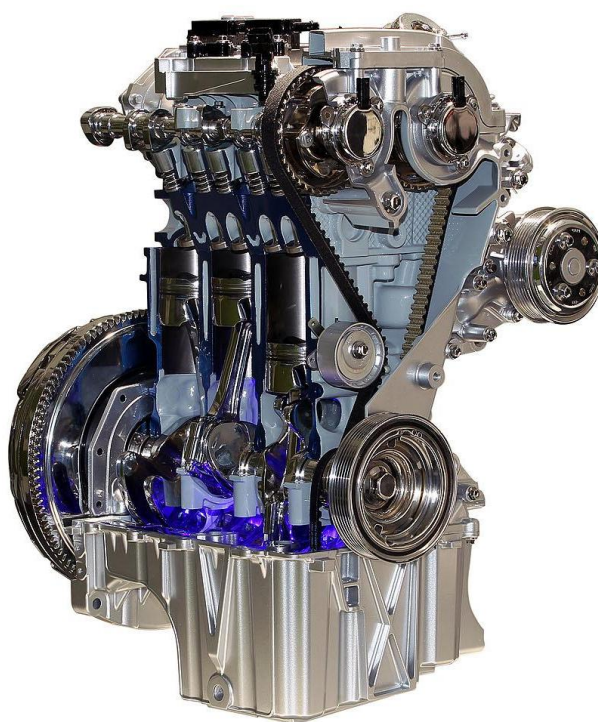


## 6 TRENDY A BUDOUCNOST

S příchodem nových technologií a stále náročnějších požadavků zákazníků jsou výrobci automobilů tlačeni k výrobě úsporných a zároveň výkonných vozů, které musejí splňovat i ty nejpřísnější exhalační normy. Proto se mimo výše uvedené systémy a způsoby pro snižování škodlivin ve výfukových plynech hledí na problém globálně, kde je důležitý i ten nejmenší detail, který má vliv na stavbu a provoz vozu, ten totiž ovlivňuje celkovou účinnost a hospodárnost automobilu. Do toho přispívá velká konkurence automobilek, neboť každá z nich chce předvést své prvenství v použití nových technologií a každá chce ukázat a vytvořit směr a trend dalšího vývoje. Tyto oblasti nových trendů a vývoje pak můžeme rozdělit do kategorií z pohledu pohonu vozidla, z pohledu nových alternativních paliv, nebo z pohledu optimalizace a hospodárnosti vozu.

### 6.1 Z POHLEDU MOTORU

Zejména kvůli požadavkům nízké spotřeby a produkce CO<sub>2</sub> se dnes již běžně aplikuje trend zvaný **downsizing** (do češtiny – zmenšování). Jeho základní myšlenkou je zmenšování objemu motoru, při zachování stejného výkonu, a omezení relativního podílu mechanických a tepelných ztát. Větší motor má totiž vyšší třecí odpory, odpory setrvačnosti, větší hmotnost a obtížnější kontrolu spalování. Downsizingu se tak dnes dociluje hlavně použitím přeplňování, přímého vstřikování paliva a proměnného časování sacích a výfukových ventilů. Takovéto zvýšení efektivity motoru zároveň přináší i snížení nežádoucích škodlivin ve výfukových plynech. Příkladem downsizingu tak může být tříválcový motor 1.0 EcoBoost od automobilky Ford, který získal dvakrát po sobě ocenění Motor roku (2012 a 2013), ten ze svého objemu 999 cm<sup>3</sup> dokáže vydolovat úctyhodných 92 kW a 170 Nm. Pro srovnání můžeme uvést motor o objemu 1,8 litru od koncernu Volkswagen z roku 1996, který dosahoval rovněž 92 kW a 173 Nm.



*Obr. 6.1.1 Motor roku 2012 a 2013 1.0 EcoBoost. [34]*

Dalším trendem je zavádění hybridních automobilů, které ke svému pohonu využívají běžného spalovacího motoru v kombinaci s elektromotorem. Podle způsobu jejich vzájemné spolupráce se dají tzv. hybridy rozdělit na kategorie **mild hybrid**, kdy elektromotor pouze doplňuje chod spalovacího motoru zejména při rozjezdech a akceleraci, neboť elektromotor, na rozdíl od spalovacího motoru má maximum točivého momentu již od nulových otáček. Dále kategorie **full hybrid**, kdy vozidlo dokáže využívat k pohonu pouze elektromotor zásobený z akumulátorů a vytvářet tak tzv. nulové emise. Nebo **plug-in hybrid**, který je rozšířením full hybridu o možnost nabití baterií z externího zdroje, například z běžné domácí zásuvky. Prvním sériově vyráběným hybridním automobilem je Toyota Prius, který získal v roce 2005 ocenění Evropské auto roku.

S novými technologiemi hlavně v oblasti kapacity a hmotnosti baterií se na silnicích začínají pomalu objevovat **elektromobily**, tedy klasické osobní vozy poháněny čistě elektřinou a vytváří tak nulové emise. Průkopníkem je Nissan Leaf, který je konstruovaný čistě pro elektrický pohon a byl také zvolen evropským a světovým autem roku 2011. Revolucionářem by se ale mohlo nazvat BMW i3, které je nejenže poháněno pouze

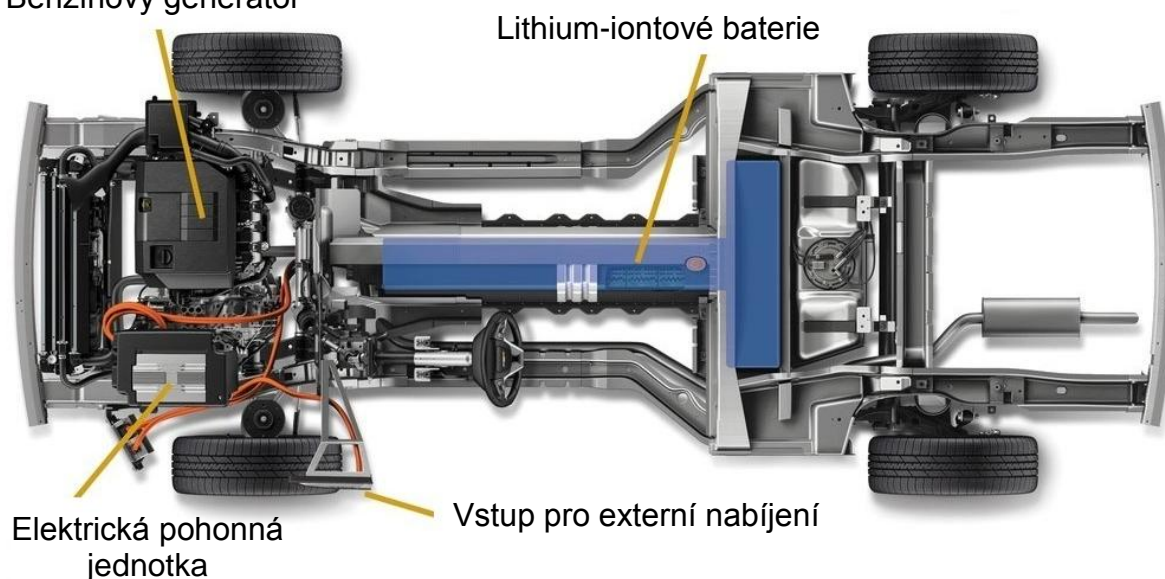




elektrickou energií, ale je rovněž vyrobeno pro maximální účinnost tohoto pohonu. Proto je jeho kostra tvořena z uhlíkových vláken pro radikální úsporu hmotnosti, interiér je vyroben z velkého podílu recyklovaných materiálů a pro snížení valivého odporu, byl vyvinut speciální rozměr pneumatik. Největším problémem této čistě elektrické koncepce je však dojezd automobilu, proto se v dlouhodobějším plánu s těmito vozy počítá především ve městech, či každodenním dojížděním do zaměstnání.

Nejzdárnějším pohonem do budoucna vypadá koncepce **elektromobilu s prodlouženým dojezdem**. Vozidlo tak bude poháněno pouze elektrickou energií, kterou bude čerpat z baterií. Jejich nabíjení však bude možno zajistit dvěma způsoby, prvním je klasická přípojka pro nabíjení z elektrické sítě. Druhým způsobem ale bude malý optimalizovaný spalovací motor s malou nádrží, který se po vybití baterií chová jako benzínový generátor, který dodává automobilu potřebnou elektrickou energii. Tuto koncepci začaly aplikovat vozy koncernu General Motors Chevrolet Volt pro americký trh, který získal ocenění Auto roku Severní Ameriky 2011 a Opel/Vauxhall Ampera pro trh evropský, který získal ocenění Evropské auto roku 2012. Tyto automobily využívají k pohonu energii z akumulátorů, které umožňují dojezd až 80 kilometrů, po přepnutí na režim prodlouženého dojezdu jsou však schopny díky generátoru poháněným spalovacím motorem o objemu 1,4 litru a 35 litrovou nádrží ujet dalších 500 kilometrů.

Benzínový generátor



**Obr. 6.1.2** Schéma koncepce elektromobilu s prodlouženým dojezdem vozidla Opel Ampera. [35]



## 6.2 Z POHLEDU ALTERNATIVNÍCH PALIV

Současným nejvíce perspektivním alternativním palivem je stlačený zemní plyn označovaný jako **CNG** (z angl. Compressed Natural Gas), lze ho najít i v jeho zkapalněné formě LNG (z angl. Liquefied Natural Gas), která se však příliš nepoužívá. Je to hlavně z důvodu jeho zásoby, jež představuje v porovnání s ropou zhruba dvojnásobek, a přestože se jedná rovněž o fosilní palivo, je považován za čistější ekologičtější alternativu benzínu a dieselu. V porovnání s nimi obsahuje menší podíl škodlivin  $\text{CO}_2$  a  $\text{NO}_x$  zhruba o 25 % a podíl CO až o 50 %. Zároveň je levnější a má vyšší oktanové číslo než benzin. V České republice na CNG jezdí i vybrané autobusy městské hromadné dopravy. Hlavní nevýhodou je zatím malá síť veřejných čerpacích stanic, kterou kompenzuje druhá nádrž na konvenční palivo. [20]

Dalším častě používaným alternativním palivem je zkapalněný ropný plyn označovaný jako **LPG** (z angl. Liquefied Petroleum Gas), který je směsí propanu a butanu. Používá se hlavně jako levnější alternativa benzínu s nižšími emisemi výfukových plynů a je určen především pro motory s přímým vstřikováním. Jedna z omezujících hlavní nevýhod tohoto druhu pohonu je zákaz parkování v podzemních garážích. Je tomu kvůli bezpečnosti, neboť LPG je těžší než vzduch a tak se při možném uniku hromadí u země.

Na druhé straně fosilních paliv je pak použití **vodíku**. Na rozdíl od nafty může být produkován v neomezeném množství a při jeho spalování vzniká jako odpadní produkt pouze voda. Automobilky BMW nebo Honda již vyrobily omezenou sérii automobilů využívajících právě tento druh paliva. Dnes je vodík převážně získáván z přírodního plynu, přičemž se do atmosféry uvolňuje uhlík v podobě  $\text{CO}_2$ . V budoucnu se však očekává, že pomocí obnovitelných zdrojů energie se bude toto palivo získávat bez jakýchkoliv škodlivých emisí. Nevýhodou tohoto čistého paliva je jeho drahá a složitá výroba a velmi malá síť čerpacích stanic.

## 6.3 Z POHLEDU OPTIMALIZACE A HOSPODÁRNOSTI VOZU

Pro zvyšování efektivity a lepší dynamiky vozu při současném snížení spotřeby paliva a nežádoucích emisí je klíčovým prvkem **celková hmotnost** automobilu, na které se podílejí i ty nejmenší díly a detaily. S tím souvisí již zmíněný downsizing, kdy nahrazením zdvihového objemu přeplňováním se výrazně zmenšuje velikost a hmotnost motoru



při zachování jízdní dynamiky. Jak u konstrukce motoru tak i konstrukce karoserie se začíná dříve běžná ocel nahrazovat hliníkovými a u dražších aut i kompozitovými CFRP (z angl. Carbon Fibre Reinforced Polymer) materiály. Z hlediska úspory objemu materiálu při zachování vysoké bezpečnosti se dále používají vysokopevnostní oceli. Díky příchodu inovativních konstrukcí mechanických dílů a systémů, jako např. převodovky a pohonu všech kol se rovněž snižuje celková hmotnost. Ruku v ruce s tím jde i snižování **odporu vzduchu** a snižování valivého odporu od pneumatik. Například BMW běžně využívá při svých vyšších modelových řadách právě pro snížení odporu vzduchu automatické ovládání vzduchových klapek.

K **celkové hospodárnosti** a ekonomice vozu pak pomáhají různé systémy a jízdní asistenti. Pokud začneme od těch nejmenších detailů, můžeme tak zmínit např. denní svícení, světlomety s LED technologií (z angl. Light emitting diode), které v případě pasivního chlazení výrazně šetří cenou energií. Dále je to elektrický posilovač řízení namísto hydraulického, nebo jejich kombinace. Rekuperace při využití zpětné brzděné energie pro odlehčení výkonu motoru. Systém start-stop, který vypíná motor na křižovatkách. Automatické převodovky s tzv. režimem plachtění, který se využívá při jízdě na dálnici, kdy se po vyšlápnutí plynového pedálu zařadí neutrál. Nebo automatické převodovky s osmi či nyní již i devíti stupni, které umožňují přesné řazení a optimální převodový poměr, v každém jízdním režimu. Na druhé straně to jsou jízdní asistenti, jako je ukazatel doporučeného rychlostního stupně pro jízdu v optimálních otáčkách, tempomat, volba jízdního režimu a další.



## ZÁVĚR

Spalovací motory mají dominantní postavení v pohonu vozidel ve všech jejich kategoriích. Zhruba před dvaceti lety se díky otevřenému trhu a masivním nasazením nových elektronických systémů umožnilo výrazného technického vývoje a pokroku v automobilovém průmyslu, což přineslo v globálním měřítku rapidní růst jejich počtu. Kvůli tomu se posunul provoz motorových vozidel na přední místa znečišťovatelů životního prostředí. To jak z hlediska toxických i hygienicky rizikových složek ve výfukových plynech, mezi které patří hlavně CO, HC, NO<sub>x</sub> a PM, tak i z hlediska produkce skleníkového plynu CO<sub>2</sub>. Proto se začalo radikálně redukovat množství vypuštěných škodlivin ve výfukových plynech pomocí přísných exhalačních norem a omezovat produkci CO<sub>2</sub> díky celosvětovým závazkům ke snížení jejich produkce. V Evropské unii je tak cílem dosáhnout v roce 2020 u osobních automobilů produkci CO<sub>2</sub> pod hranici 95 g/km, při současně regulaci škodlivin ve výfukových plynech za pomoci norem Euro. Díky kterým jsou výrobci nuceni zdokonalovat proces spalování a zavádět nové technologie a systémy pro zmenšení podílu nežádoucích emisí, jako nyní zavedení selektivního, nebo NO<sub>x</sub> zásobníkového katalyzátoru u vznětových motorů pro splnění nadcházející normy Euro 6, která vstoupí v platnost v září 2014.

Snižování podílu škodlivin ve výfukových plynech můžeme provádět dvěma způsoby aktivně nebo pasivně. Aktivní způsob snižování škodlivin znamená předejití jejich vzniku, což uskutečníme výběrem kvalitního paliva nebo zdokonalováním spalovacího procesu uvnitř motoru. Druhým účinnějším způsobem je pasivní snižování obsahu již vzniklých škodlivin za pomoci dodatečných systémů a filtrů.

Zážehové motory v porovnání s motory vznětovými mají vzhledem k jejich nižší termodynamické účinnosti větší spotřebu paliva, která přináší vyšší hodnoty skleníkového plynu. Na druhou stranu však mají hladší chod motoru a za pomoci zejména trojcestného katalyzátoru mnohem menší podíl nežádoucích škodlivin ve výfukových plynech. Pro řešení nižší spotřeby se uplatňuje technologie převzatá ze vznětových motorů, kdy jde o spalování chudé směsi, což umožňuje přímé vstřikování a vrstvení směsi. Zároveň to ale přináší i nevýhody, se kterými se potýká právě diesellový motor a to ve zvýšené produkci NO<sub>x</sub>, kterou řeší recirkulací výfukových plynů a výskytu pevných částic, na které se zatím u benzinových motorů normy Euro nevztahují.



Vznětové motory navzdory jejich velké výhodě v nízké spotřebě a velkého točivého momentu mají nevýhodu v omezené možnosti ošetřit výfukové plyny z hlediska obsahu  $\text{NO}_x$  a pevných částic. K redukci CO a HC se využívá oxidačního katalyzátoru. Pro snížení podílu  $\text{NO}_x$  se však za cenu zvýšení spotřeby paliva musí uplatňovat recirkulace výfukových plynů a za krátko i nezbytnost použití metody selektivní katalytické redukce, či  $\text{NO}_x$  zásobníkového katalyzátoru. Snižování problematických pevných částic se naopak řeší vysokými vstřikovacími tlaky a zavedením filtru pevných částic.

V důsledku snižování podílu nežádoucích škodlivin ve výfukových plynech můžeme za hlavní trend nazvat downsizing a přeplňování. Na tomto poli začíná velký boj konkurence mezi konstrukčními a vývojovými centry, které se snaží přijít s malým, úsporným, ekologickým motorem, který je ale zároveň stejně výkonný jako motor o kategorii větší. Určitou cestou downsizingu se tak rovněž lze vydat formou hybridního pohonu, kdy spalovací agregát spolupracuje s elektrickým motorem. Klasické elektromobily mají do budoucna vyhlídku hlavně pro provoz ve městech, proto větší perspektivu užití nabízí elektromobily s prodlouženým dojezdem, které využívají optimalizovaného spalovacího motoru jakožto generátoru elektrické energie. Co se týče alternativních paliv, zůstává největším problémem hustota sítě čerpacích stanic a vyšší pořizovací náklady, jinak nabízejí ekologičtější a levnější provoz než klasická koncepce benzínu a dieselu. Velkou otevřenou oblastí pak zůstává celková hospodárnost vozu, kam lze zahrnout snížení hmotnosti automobilu, nízká energetická náročnost jednotlivých systémů a všestranné přizpůsobení vozu různé provozní zátěže.

S globálním příchodem snižování škodlivin ve výfukových plynech tak postupně přichází zánik velkých atmosférických motorů, které už nebudou moci splňovat zpřísnující se exhalační normy. Redukce podílu nežádoucích emisí tlačí na jedné straně do objevování nových technologií a zvedání účinnosti spalovacích motorů, bohužel však na druhé straně často na úkor spolehlivosti a životnosti. Závěrem pak lze říci, že na snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech moderních motorů se podílí celý automobil od těch nejmenších detailů v konstrukci vozu až po samotného člověka a jeho styl a přístup k řízení.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, František. *Příslušenství vozidlových motorů*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2002. ISBN 80-238-8755-6.
- [2] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003. ISBN 8023887564.
- [3] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily (3): Motory*. Brno: Avid, 2007. ISBN 9788090367173.
- [4] GSCHEIDLE, R. a kolektiv. *Příručka pro automechanika*. 3. vyd. Praha: Europa - Sobotáles, 2007, 685 s. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [5] BAZALA, J. *Návrh EGR výměníku pro recirkulaci výfukových plynů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Beran.
- [6] SMILEK, T. *Možnosti vstřikovacího systému common - rail*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 23 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Dundálek, PhD.
- [7] THORŽ, F. *Emise, jejich měření a principy konstrukce systému pro jejich snižování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marián Laurinec.
- [8] VLK, F. Soudní inženýrství. *Přímé vstřikování benzínu* [online]. 2004 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-01-67-71.pdfnet/articles/variabilni-casovani-ventilu/>
- [9] BEROUN, S. Technická univerzita v Liberci Katedra vozidel a motorů. *Spalovací proces ve válci pístového spalovacího motoru: Výfukové emise* [online]. Prosinec 2002 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/studenti/old/PZP-vyfuk-skodl.pdf>
- [10] BEROUN, S. Katedra vozidel a motorů Technická univerzita v Liberci. *Vozidlové motory* [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/VOZMOT.pdf>
- [11] PEXA, M. Česká zemědělská univerzita v Praze Katedra jakosti a spolehlivosti strojů. *Produkce emisních složek výfukových plynů* [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://tf.czu.cz/~PEXA/Budejovice/Prednasky/P-Emise.pdf>
- [12] PÁV, K. Technická univerzita v Liberci Katedra vozidel a motorů. *Emise ve výfukových plynech PSM* [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: [http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/VM\\_Sem/Pav\\_10b\\_Emise%20ve%20v%C3%BDfukov%C3%BDch%20plynech%20PSM.pdf](http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/VM_Sem/Pav_10b_Emise%20ve%20v%C3%BDfukov%C3%BDch%20plynech%20PSM.pdf)





- [13] ŠMERDA, T, J. ČUPERA. Agrics. *Emise vznětového motoru a systém SCR* [online]. 2002 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.agrics.cz/obrazky-soubory/emise-vznětového-motoru-a-system-scr-4107d3.pdf?redir>
- [14] SAJDL, J. Autolexicon. *Emisní norma Euro* [online]. [cit. 2014-04-19]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro/>
- [15] SAJDL, J. Autolexicon. *Twin Spark* [online]. [cit. 2014-04-04]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/twin-spark/>
- [16] SAJDL, J. Autolexicon. *Variabilní časování ventilů* [online]. [cit. 2014-04-05]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/variabilni-casovani-ventilu/>
- [17] SAJDL, J. Autolexicon. *SCR (Selective catalytic reduction)* [online]. [cit. 2014-05-03]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/skr-selective-catalytic-reduction/>
- [18] SAJDL, J. Autolexicon. *AdBlue* [online]. [cit. 2014-05-03]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/adblue/>
- [19] SAJDL, J. Autolexicon. *DPF (Diesel Particulate Filter)* [online]. [cit. 2014-05-07]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [20] SAJDL, J. Autolexicon. *CNG (Compressed Natural Gas)* [online]. [cit. 2014-05-10]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/cng-compressed-natural-gas/>
- [21] The Internacional Council on Clean Transportation. *Global passenger vehicle standards* [online]. 2013 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.theicct.org/info-tools/global-passenger-vehicle-standards>
- [22] Jirkovodoupje. *Vstřikování* [online]. 2007 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://jirkovodoupje.wz.cz/vstrikovani.html>
- [23] International context [obrázek]. *The International Council on Clean Transportation* [online]. Leden 2014 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: [http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate\\_EU-95gram\\_jan2014.pdf](http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU-95gram_jan2014.pdf)
- [24] The situation today [obrázek]. *The International Council on Clean Transportation* [online]. Leden 2014 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: [http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate\\_EU-95gram\\_jan2014.pdf](http://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU-95gram_jan2014.pdf)
- [25] Nízkoemisní zóny [obrázek]. *Ukázka plakety* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/nizkoemisni\\_zony/\\$FILE/000-plakety\\_ukazka-20131025.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/nizkoemisni_zony/$FILE/000-plakety_ukazka-20131025.pdf)
- [26] Řez spalovacím prostorem – Twin Spark [obrázek]. *Twin Spark* [online]. [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/twin-spark/>



- [27] Variabilní časování ventilů [obrázek]. *Časování ventilů* [online]. [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/variabilni-casovani-ventilu/>
- [28] Tecplot [obrázek]. *Tecplot 360 helps design internal combustion engines* [online]. Zář 2010 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: [http://www.tecplot.com/wp-content/uploads/2010/09/large\\_eddy\\_simulation.png](http://www.tecplot.com/wp-content/uploads/2010/09/large_eddy_simulation.png)
- [29] Intech [obrázek]. *GDI* [online]. Květen 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-internal-combustion-engines-and-fuel-technologies/combustion-process-in-the-spark-ignition-engine-with-dual-injection-system>
- [30] Fuel Stratified injection (FSI) von Audi und VW [obrázek]. *FSI beim Audi* [online]. Leden 2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/otto/fsi.htm>
- [31] Autodíly Cardo [obrázek]. *EGR ventnil Wahler 7451D* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.autodily-cardo.cz/obrazky/60790/egr-ventil-wahler-7451d-original.jpg>
- [32] Autodíly Citroeny [obrázek]. *EGR ventil Valeo* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://obchod.citroeny.cz/1909-thickbox\\_default/egr-ventil-valeo-pro-motor-16hdi-citroen-berlingo-c2-c3-c4-c4-picasso-c5-jumpy-xsara-picasso.jpg](http://obchod.citroeny.cz/1909-thickbox_default/egr-ventil-valeo-pro-motor-16hdi-citroen-berlingo-c2-c3-c4-c4-picasso-c5-jumpy-xsara-picasso.jpg)
- [33] Motoring assist [obrázek]. *DPF* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://blog.motoringassist.com/motoring-advice/wp-content/uploads/2013/11/graphic-small.jpg>
- [34] 1.0 EcoBoost [obrázek]. *Ford 1.0 EcoBoost* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://s1.cdn.autoevolution.com/images/news/2012-downsizing-is-upon-us-53043\\_2.jpg](http://s1.cdn.autoevolution.com/images/news/2012-downsizing-is-upon-us-53043_2.jpg)
- [35] Opel Ampera [obrázek]. *Opel Ampera* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://davethecarguy.files.wordpress2012/05/opel-ampera.com/-1.jpg>





## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 2.2.1</b>	Porovnání redukce emisí CO <sub>2</sub> na světových trzích. [23]	17
<b>Obr. 2.2.2</b>	Snížení emisí CO <sub>2</sub> jednotlivých automobilových koncernů v rámci norem Euro. [24]	18
<b>Obr. 2.3</b>	Navrhované emisní plakety pro ČR [25]	19
<b>Obr. 4.3</b>	Řez spalovacím prostorem se dvěma svíčkami. [26]	22
<b>Obr. 4.4.1</b>	Schéma variabilního časování ventilů v závislosti na horní, dolní úvrati a natočení vačkové hřídele. [27]	24
<b>Obr. 4.4.2</b>	Snížení spotřeby paliva a škodlivin HC díky přechodu na čtyřventilovou techniku. [1]	25
<b>Obr. 4.6.2</b>	Uspořádání spalovacího prostoru umožňující v kombinaci s přímým vstřikováním vrstvené plnění. [8]	27
<b>Obr. 4.7</b>	Počítačová modelace rozprášení paliva u vznětových motorů. [28]	28
<b>Obr. 4.9.1</b>	Speciální tvar pístu s deflektorem pro zážehové motory umožňující vrstvené plnění. [29]	30
<b>Obr. 4.9.2</b>	Plnění spalovacího prostoru pomocí přímého vstřikování dle zatížení motoru. [30]	31
<b>Obr. 4.9.3</b>	Závislost koncentrace škodlivin ve výfukových plynech na bohatosti spalované směsi u zážehového motoru. [9]	31
<b>Obr 5.1.1</b>	Schéma jednokomorového oxidačního katalyzátoru. [1]	34
<b>Obr 5.1.2</b>	Schéma dvoukomorového katalyzátoru. [1]	35
<b>Obr 5.1.3.1</b>	Schéma jednokomorového třicestného katalyzátoru. [1]	36
<b>Obr. 5.1.3.2</b>	Konstrukce trojcestného katalytického konvertoru. [1]	37
<b>Obr. 5.1.4</b>	Schéma umístění NO <sub>x</sub> katalyzátoru. [1]	38
<b>Obr. 5.1.5</b>	Schéma funkce oxidačního a selektivního katalyzátoru u vznětového motoru. [5]	40
<b>Obr. 5.2.1</b>	Vliv podílu recirkulovaných výfukových plynů na tvorbu škodlivých látek. [1]	41
<b>Obr. 5.2.2</b>	Pneumatický EGR ventil. [31]	42
<b>Obr. 5.2.3</b>	Elektromagnetický EGR ventil. [32]	42
<b>Obr. 5.2.4</b>	Schéma vysokotlakého systému EGR. [5]	43
<b>Obr. 5.2.5</b>	Schéma nízkotlakého systému EGR. [5]	43



<b>Obr. 5.3</b>	Schéma filtru pevných částic DPF. [33]	45
<b>Obr. 6.1.1</b>	Motor roku 2012 a 2013 1.0 EcoBoost. [34]	48
<b>Obr. 6.1.2</b>	Schéma koncepce elektromobilu s prodlouženým dojezdem vozidla Opel Ampera. [35]	49

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf 1.3.1</b>	Podíl výfukových plynů u zážehových motorů. [11]	14
<b>Graf 1.3.2</b>	Podíl výfukových plynů u vznětových motorů. [11]	14

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 2.1</b>	Porovnání limitních hodnot škodlivin u zážehového a vznětového motoru mezi jednotlivými normami Euro. [14]	15
<b>Tab. 4.8</b>	Porovnání mechanických ztrát mezi zážehovým a vznětovým motorem v procentech ztrátového výkonu. [2]	29